



# K problematice sušících křivek jako parametru komfortu

## Disertační práce

*Studijní program:*

P3106 Textilní inženýrství

*Studijní obor:*

Textilní technika a materiálové inženýrství

*Autor práce:*

**Ing. Tereza Heinisch, DiS.**

*Školitel práce:*

doc. Ing. Vladimír Bajzík, Ph.D.

Katedra hodnocení textilií



## Prohlášení

Prohlašuji, že svou disertační práci jsem vypracovala samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé disertační práce a konzultantem.

Jsem si vědoma toho, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má disertační práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědoma následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

31. srpna 2020

Ing. Tereza Heinisch, DiS.

## ANOTACE

Předmětem dizertační práce je hodnocení sušících křivek ve vztahu k termofyziologickému komfortu zejména sportovních a ochranných textilií. Existuje několik metodik, které se dobou sušení zabývají. Bohužel však u nich nejsou jednoznačně definované podmínky sušení, především rychlost proudění, odvod vlhkosti z prostoru nad vzorkem a není definovaná teplota vzorku během sušení. Hlavní pozornost dizertační práce je tedy věnována návrhu a realizaci přístroje, který měří za izotermních podmínek. Nový přístroj je schopen zajistit rovnoměrné ofukování testovaného vzorku a lze na něm nastavit různé rychlosti proudění. K realizaci sušících křivek byl zvolen gravimetrický způsob, který nejpřesněji odráží množství zbývajících vlhkosti v textiliích. V práci jsou porovnány dva způsoby vlhčení vzorků, různé rychlosti proudění nad vzorkem a vliv izotermních a neizotermních podmínek na rychlost sušení. Poslední část práce je zaměřena na hodnocení termofyziologického komfortu s ohledem na zbývajících množství vlhkosti v textiliích během procesu sušení. Pro vyhodnocení termofyziologického komfortu slouží naměřená data měrné tepelné jímavosti a zároveň subjektivní hodnocení vnímání pocitu sucha či vlhka z textilií.

**Klíčová slova:** sušící křivky, rychlost sušení, konstantní rychlost proudění vzduchu, vlhkost, termofyziologický komfort

## ANNOTATION

The goal of this dissertation is evaluation of drying rate in relation to thermophysiological comfort namely of sport and protective clothing. There are several methodologies, which are describing the time of drying, but unfortunately, none of them describes the conditions of drying, most importantly the velocity of air flow above the sample, water vapour concentration above the sample and temperature of the sample during its drying. The main focus of this dissertation is therefore devoted to the design and realization of a device, which is measuring under isothermal conditions. The new device is capable of ensuring constant air flow of the measured sample; there is also a possibility to set various flow rates. A gravimetric method was chosen for the drying curves, which most accurately reflects the amount of residual moisture in the textiles. The work compares two methods of wetting samples, different flow rates above the sample and the effect of isothermal and non-isothermal conditions on the drying rate. The last part deals with the evaluation of thermophysiological comfort with considering the remaining moisture in textiles during the drying process. For evaluation of the thermophysiological comfort, the measured data of specific heat absorption as well as the subjective evaluation of the perception of the feeling of dryness or moisture from textiles are used.

**Keywords:** drying curves, drying rate, constant air flow velocity, moisture, thermophysiological comfort

## **АННОТАЦИИ**

Темой диссертации является оценка диаграмм процесса сушки с точки зрения термо-физиологического комфорта особенно спортивные и защитные текстильные изделия. Существует несколько методик, изучающих процесс сушки, но, к сожалению, в них четко не определяются условия сушки, особенно скорость течения воздуха или отведение влаги из пространства над образцом и определенная температура образца во время сушки. Основной целью диссертации поэтому стала разработка и реализация прибора для измерения параметров сушки в изотермических условиях. Новое устройство способно обеспечить равномерный обдув исследуемого образца, позволяет регулировать скорость течения воздуха. Для построения кривых сушки используется гравиметрический метод, который наиболее точно отражает количество остаточной влаги в текстильном образце. В работе сравниваются два метода смачивания образцов, изучается влияние скорости течения воздуха над образцом на скорость сушки при изо- и неизо-термических условиях. Последняя часть работы посвящена оценке термо-физиологического комфорта по отношению к оставшемуся количеству влаги в текстильном материале во время процесса сушки. Для оценки термо-физиологического комфорта используются данные измерений удельного теплопоглощения и субъективной оценки восприятия меры сухости или влажности текстильного материала.

**Ключевые слова:** диаграммы процесса сушки, скорость сушки, постоянная скорость течения воздуха, влажность, термо-физиологический комфорт

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych ráda poděkovala celé naší katedře, především svému školiteli panu doc. Ing. Vladimíru Bajzíkovi, Ph.D. za jeho podporu a cenné rady po celou dobu studia. Poděkování patří také panu prof. Ing. Luboši Hesovi, DrSc. za pomoc při řešení odborných problémů souvisejících s tématem této práce. Dále mé poděkování patří panu prof. Ing. Tomáši Vítovi, Ph.D. a prof. Ing. Jakubu Wienerovi, Ph.D. za poskytnuté konzultace a celé mé rodině za trpělivost.

# OBSAH

<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>8</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>1 Předmět a cíle dizertační práce .....</b>	<b>12</b>
<b>2 Přenosové jevy .....</b>	<b>13</b>
2.1 Molekulární přenos.....	14
2.1.1 Newtonův zákon proudění v tekutinách.....	14
2.1.2 Fourierův zákon vedení tepla .....	15
2.1.3 Fourierova-Kirchhoffova diferenciální rovnice vedení tepla.....	15
2.1.3.1 Podmínky jednoznačnosti řešení úloh přestupu tepla .....	17
2.1.4 Fickův zákon difuze hmoty .....	18
2.1.5 Analogie molekulárních přenosových jevů.....	19
2.2 Konvekce .....	20
2.2.1 Přenos tepla konvekcí .....	20
2.2.1.1 Volná konvekce v neomezeném prostoru .....	22
2.2.1.2 Volná konvekce v omezeném prostoru .....	22
2.2.1.3 Nucená konvekce .....	23
2.2.2 Přenos vlhkosti konvekcí .....	25
2.3 Přenos tepla radiací.....	27
2.3.1 Přenos tepla radiací mezi plochami.....	29
<b>3 Význam přenosových jevů v soustavě člověk – oděv – prostředí .....</b>	<b>30</b>
3.1 Historie oděvního komfortu .....	30
3.2 Oděvní komfort a jeho jednotlivé složky .....	31
3.3 Senzorický komfort.....	34
3.4 Termofyziologický komfort .....	34
3.5 Psychologický komfort.....	37
3.6 Prostředí .....	38
3.7 Oděv.....	40
3.7.1 Vrstvení oděvu .....	42
<b>4 Sorpční vlastnosti textilních materiálů .....</b>	<b>44</b>
4.1 Nasákavost, navlhavost a vysýchavost.....	44
4.2 Smáčivost .....	46
4.3 Vzlínavost.....	48
4.4 Rovnovážná sorpce .....	51
4.5 Kinetika sorpce .....	53
4.6 Tepelné jevy při sorpci.....	54
4.7 Propustnost vodních par a odvod vlhkosti skrz celý oděvní systém .....	55
<b>5 Zhodnocení problematiky sušení textilií a dostupné metody.....</b>	<b>57</b>
5.1 Stávající metodiky a normy.....	57
5.1.1 AATCC Test Method 195-2009: Liquid Moisture Management Properties of Textile Fabrics.....	58
5.1.2 AATCC Test Method 199-2011: Drying Time of textiles: Moisture analyzer Method. ....	58
5.1.3 AATCC Test Method 200-2017: Drying Rate of Textiles at their Absorbent Capacity: Air Flow Method .....	59
5.1.4 AATCC Test Method 201-2014: Drying Rate of Textiles at their Absorbent Capacity: Air Flow Method .....	60
5.1.5 TNI CEN/TR 16422: Klasifikace termoregulačních vlastností .....	60
5.1.6 ISO 17616: Textiles: Determination of moisture drying rate .....	61

5.1.7 JIS L 1096: 1999 – Drying speed.....	61
5.2 <i>Proces sušení</i> .....	62
5.2.1 Hodnocení procesu sušení s ohledem na termofyziologický komfort .....	65
<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b> .....	<b>72</b>
<b>6 Návrh a realizace prototypu přístroje</b> .....	<b>73</b>
6.1 <i>Popis přístroje</i> .....	76
6.2 <i>Výpočet přestupu tepla</i> .....	77
6.2.1 Chladicí efekt vznikající odparem vlhkosti při volné hladině .....	78
6.2.2 Výpočet koeficientu přestupu tepla $\alpha$ .....	80
6.2.3 Přestup tepla žebry chladiče .....	81
6.2.4 Výpočet rozdílu teplot.....	81
6.3 <i>Návrh konstrukčních úprav prototypu přístroje</i> .....	82
6.4 <i>Ověření opakovatelnosti měření</i> .....	86
<b>7 Analýza sušících křivek</b> .....	<b>89</b>
7.1 <i>Vybrané materiály a příprava vzorků</i> .....	89
7.2 <i>Porovnání metod vlhčení vzorků A a B</i> .....	92
7.3 <i>Vliv rychlosti proudění nad měřenými vzorky</i> .....	104
7.4 <i>Vliv izotermních a neizotermních podmínek na rychlost sušení</i> .....	108
7.5 <i>Porovnání výsledků z nového přístroje s naměřenými daty z přístroje MMT</i> .....	109
<b>8 Vliv obsahu přidané vlhkosti v textiliích na termofyziologický komfort</b> .....	<b>112</b>
8.1 <i>Subjektivní hodnocení “suchosti” či “vlhkosti” zavlhčené textilie</i> .....	114
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>117</b>
<b>Seznam použité literatury</b> .....	<b>123</b>
<b>Seznam publikovaných prací</b> .....	<b>131</b>
<b>Seznam příloh</b> .....	<b>133</b>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

symbol	název	jednotka
$a$	teplotní vodivost	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
$A_1$	plocha vzorku	$[\text{m}^2]$
$A_2$	plocha průřezu žebra	$[\text{m}^2]$
$A_3$	celková hodnota průřezu všech žebířů u paty žebířů	$[\text{m}^2]$
$b_1$	délka destičky	$[\text{m}]$
$b_2$	charakteristický průměr pro nekruhový kanál	$[\text{m}]$
$b_3$	výška žebra	$[\text{m}]$
$C$	konstanta pro konvektivní přenos	$[-]$
$\cos\theta$	kosinus kontaktního úhlu	$[-]$
$C_A$	koncentrace složky A	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
$C_p$	koncentrace penetrantu na povrchu vlákna	$[-]$
$c_p$	měrná tepelná kapacita	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
$c_{pA}$	měrná tepelná kapacita vlhkého vzduchu	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
$C_t$	koncentrace penetrantu ve vlákne	$[-]$
$C_v$	rovnovážná koncentrace penetrantu ve vlákne	$[-]$
$C_{WSAT}$	koncentrace vodní páry na povrchu desky	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
$C_{WE}$	koncentrace vodní páry v proudu vzduchu	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
$c_0$	rychlost světla ve vakuu	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$C_0$	koncentrace penetrantu v okolí	$[-]$
$C_1, C_2$	indexy pro výpočet zářivého toku černého tělesa	$[-]$
$C_{12}$	součinitel vzájemného sálání	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$
$d_e$	ekvivalentní průměr příze	$[\text{mm}]$
$d$	průměr	$[\text{m}]$
$D_{AB}$	difuzní součinitel binární směsi	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
$D_C$	difuzní součinitel vztahovaný k rozdílu koncentrací	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
$D_v$	koeficient difuzivity (difuzní součinitel) vodní páry	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
$D_0$	konstanta související s entropií systému	$[-]$
$E$	aktivační energie difuze	$[\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}]$
$E_0$	hustota zářivého toku černého tělesa	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$
$E_{\lambda,0}$	spektrální hustota zářivého toku černého tělesa	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}]$
$f_F$	koeficient drsnosti	$[-]$
$g$	tíhové zrychlení	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$
$h$	Planckova konstanta	$[\text{J} \cdot \text{s}]$
$H, H_{max}$	výška, maximální výška	$[\text{m}]$
$I$	entalpie	$[\text{J}]$
$k$	propustnost porézních materiálů	$[\text{m}^2]$
$K$	konstanta pro konvektivní přenos	$[-]$
$k_B$	Boltzmannova konstanta	$[\text{J} \cdot \text{K}^{-1}]$
$K_N$	rozdělovací koeficient	$[-]$
$k_l$	poměr nezavlhčené plochy a celkové plochy vzorku	$[-]$
$l_s$	tloušťka stěny	$[\text{m}]$
$l$	konstanta pro konvektivní přenos	$[-]$
$L$	charakteristický rozměr	$[\text{m}]$
$L_M$	pracovní výkon	$[\text{W}]$
$l_v$	výparné teplo vody	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$\dot{m}$	měrný hmotnostní tok	$[\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$



symbol	název	jednotka
$m$	konstanta pro konvektivní přenos	[-]
$M$	celkový metabolický výkon	[W]
$m_F$	hmotnost suchého materiálu	[kg]
$M_R$	rovnovážné množství penetrantu ve vlákne	[kg]
$M_t$	celkové množství penetrantu ve vlákne	[kg]
$m_w$	hmotnost vody v materiálu	[kg]
$n$	konstanta pro konvektivní přenos	[-]
$o$	obvod mezery mezi žebry	[m]
$p$	tlak	[Atm], [Pa]
$P$	obvod žebra	[m]
$p_p$	parciální tlak vodní páry ve vzduchu	[Pa]
$p_p^*$	parciální tlak nasycené vodní páry	[Pa]
$p_{pWE}$	parciální tlak vodní páry v proudu vzduchu	[Pa]
$p_{pWSAT}$	parciální tlak vodní páry na povrchu desky	[Pa]
$\dot{q}$	plošná hustota tepelného toku	[W·m <sup>-2</sup> ]
$Q$	teplo	[J]
$\dot{Q}$	tepelný tok	[W]
$\dot{Q}_{cond}$	tepelný tok kondukcí = vedením	[W]
$\dot{Q}_{conv}$	tepelný tok konvekcí = prouděním	[W]
$\dot{Q}_{ins}$	tepelný tok neustálým odpařováním z kožních pórů	[W]
$\dot{Q}_{persp}$	tepelný tok vzniklý odpařováním potu	[W]
$\dot{Q}_{persp,e}$	tepelný tok odpařováním na vnitřním povrchu plic	[W]
$\dot{Q}_{rad}$	tepelný tok radiací = zářením	[W]
$\dot{Q}_{res}$	tepelný tok dýcháním	[W]
$\dot{q}_{zdroje}$	hustota tepelného toku vztažená na objem	[W·m <sup>-3</sup> ]
$\dot{q}_0$	plošná hustota tepelného toku z volné hladiny	[W·m <sup>-2</sup> ]
$\dot{q}_1$	plošná hustota tepelného toku z volné hladiny zakryté vzorkem	[W·m <sup>-2</sup> ]
$r$	měrná plynová konstanta	[J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$R$	univerzální plynová konstanta	[J·K <sup>-1</sup> ·mol <sup>-1</sup> ]
$R^2$	koeficient determinace	[-]
$R_{et}$	výparný odpor	[m <sup>2</sup> ·Pa·W <sup>-1</sup> ]
$r_k, r_L$	poloměr kapiláry, poloměr zakřiveného povrchu kapaliny	[m]
$RH$	relativní vlhkost vzduchu	[%]
$S$	plocha	[m <sup>2</sup> ]
$t$	čas	[s]
$t_a$	teplota vzduchu	[°C]
$T$	termodynamická teplota	[K]
$T_a$	termodynamická teplota vzduchu	[K]
$T_D$	přechodová teplota difuze	[K]
$T_p$	jemnost příze	[tex]
$T_1, T_2$	termodynamické teploty povrchů	[K]
$v$	rychlost	[m·s <sup>-1</sup> ]
$V$	objem	[m <sup>3</sup> ]
$W_w$	koncentrace vlhkosti v materiálu	[-]
$W_{WC}$	kritická koncentrace vlhkosti v materiálu	[-]
$x_{WSAT}$	měrná vlhkost na povrchu (rel. podíl páry a vzduchu)	[kg·kg <sup>-1</sup> ]
$x_{WE}$	měrná vlhkost v proudu vzduchu (rel. podíl páry a vzduchu)	[kg·kg <sup>-1</sup> ]
$x, y, z$	vzdálenost na ose x, y, z	[m]

symbol	název	jednotka
$\alpha$	součinitel přenosu tepla prouděním (součinitel přestupu tepla)	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
$\alpha_r$	součinitel přenosu tepla radiací = zářením	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
$\beta_C$	součinitel přenosu hmoty vztažený k rozdílu koncentrací	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$\beta_p$	součinitel přenosu hmoty vztažený k rozdílu parciálních tlaků	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}]$
$\beta_T$	teplotní roztažnost	$[\text{K}^{-1}]$
$\beta_x$	součinitel přenosu hmoty vztažený k rozdílu měrných vlhkostí	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$
$\delta$	tloušťka vzduchové mezery	$[\text{m}]$
$\gamma_{LV}$	povrchové napětí na rozhraní kapalina a vzduch (plyn)	$[\text{N} \cdot \text{m}^{-1}]$
$\gamma_{SL}$	povrchové napětí na rozhraní pevná látka a kapalina	$[\text{N} \cdot \text{m}^{-1}]$
$\gamma_{SV}$	povrchové napětí na rozhraní pevná látka a vzduch (plyn)	$[\text{N} \cdot \text{m}^{-1}]$
$\varepsilon$	emisivita	$[-]$
$\eta$	dynamická viskozita	$[\text{Pa} \cdot \text{s}]$
$\eta_s$	dynamická viskozita u stěny	$[\text{Pa} \cdot \text{s}]$
$\theta$	Youngův kontaktní úhel	$[\text{°}]$
$\theta^*$	zdánlivý Youngův kontaktní úhel	$[\text{°}]$
$\lambda$	měrná tepelná vodivost	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
$\lambda_{ekv}$	ekvivalentní měrná tepelná vodivost	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
$\lambda_{max}$	maximální vlnová délka	$[\mu\text{m}], [\text{m}]$
$\lambda_r$	vlnová délka	$[\mu\text{m}], [\text{m}]$
$\nu$	kinematická viskozita	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
$\zeta$	teplotní součinitel	$[\text{K}^3]$
$\pi$	zaplnění příze	$[-]$
$\rho$	hustota	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
$\sigma$	Stephan-Boltzmannova konstanta	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$
$\tau_{yx}$	tečné napětí	$[\text{Pa}]$
$\varphi_{12}$	geometrická charakteristika vzájemného sálání povrchů	$[-]$
$\phi, \phi_1, \phi_2$	koeficienty značící poměrné části daných oblastí	$[-]$
$\chi^2$	rozdělení chí kvadrát	$[-]$

zkratka	název
<i>atd.</i>	a tak dále
<i>Ar</i>	Archimédovo číslo
<i>Gr</i>	Grashofovo číslo
<i>kol.</i>	kolektiv
<i>Le</i>	Lewisovo číslo
<i>M<sub>e</sub></i>	medián
<i>MMT</i>	Moisture Management Tester = přístroj k měření řízení vlhkosti
<i>Nu</i>	Nusseltovo číslo
<i>obr.</i>	obrázek
<i>PLC</i>	Programmable Logic Controlle = systémová řídicí jednotka
<i>Pr</i>	Prandtlovo číslo
<i>Ra</i>	Rayleighovo číslo
<i>Re, Re<sub>x</sub></i>	Reynoldsovo číslo, kritická hodnota Reynoldsova čísla
<i>rel.</i>	relativní
<i>Sc</i>	Schmidtovo číslo
<i>tab.</i>	tabulka
<i>tzv.</i>	tak zvaný

## ÚVOD

V současné době se často setkáváme s pojmem funkční textilie. Většina textilních výrobců tímto termínem označuje především textilie či oděvy ze syntetických vláken. Ty mají výrazně menší navlhavost než vlákna přírodní a často vzhledem ke svému speciálnímu průřezu zajistí rychlý rozvod vlhkosti v ploše a její následné odpaření. Díky tomu lze u funkčních textilií očekávat rychlejší odvod potu od těla a tím pádem i lepší termofyziologický komfort během sportovních aktivit. Kromě oděvů ze syntetických vláken se samozřejmě lze setkat i s prádlem z vláken přírodních. V posledních letech se velmi často pro výrobu spodního prádla využívají vlněná vlákna, která si uchovávají výborné termoregulační vlastnosti i přes svou vysokou navlhavost. Při volbě vhodného oděvu je z hlediska komfortních vlastností nutné brát v potaz především klimatické podmínky, ve kterých bude oděv nošen s ohledem na účel použití.

Kromě rychlého odvodu vlhkosti jsou důležitými vlastnostmi funkčních textilií také paropropustnost, tepelně izolační vlastnosti, větruodolnost a nepromokavost (nebo-li hydrostatická odolnost). U spodní vrstvy jsou nejdůležitější první dvě jmenované vlastnosti, větruodolnost a nepromokavost se uplatní pouze u svrchních oděvů. Aby oděvní systém správně fungoval, je nutné dodržet zásady správného vrstvení. Proto by všechny oděvní vrstvy měly zajistit dobrou úroveň paropropustnosti a rychlosti sušení. V běžném životě tedy proces sušení oděvů významně přispívá k celkovému termofyziologickému komfortu nositele. V případě sportovních nebo ochranných oděvů je tedy významným parametrem k hodnocení termofyziologického komfortu a měla by mu být věnována větší pozornost.

Výrobci oděvů se předhánějí v lepších hodnotách jednotlivých vlastností u svých oděvních výrobců a s tím souvisí i vzrůstající zájem o kvalitní testování dostupných materiálů. Tento trend je patrný i na každoroční výstavě ISPO, kde české outdoorové firmy vždy zaujmají významnou část expozice. Vzhledem k výše zmíněným aspektům je třeba, aby jednotlivé laboratoře komfortu po celém světě byly schopny zajistit stejné podmínky testování a zároveň vycházely i ze stejných norem, což je bohužel u měření některých vlastností nedostatečné. Například pro hodnocení rychlosti sušení existuje norem několik. Tyto normy se liší použitými přístroji, způsoby hodnocení a podmínkami měření, které jsou v nich často nejednoznačně definované.

# 1 Předmět a cíle dizertační práce

Předmětem dizertační práce je studium komfortních vlastností textilií - především rychlosti sušení s důrazem na možnosti testování a hodnocení. Hlavním cílem práce je vytvořit nové zařízení včetně metodiky měření, které bude schopné zajistit stejné izotermní klimatické podmínky pro jednotlivá měření i s možností regulace rychlosti ustáleného proudění okolního vzduchu nad testovaným vzorkem.

Vlastní práce je rozdělena do osmi kapitol. Vzhledem k tématu dizertační práce je druhá kapitola zaměřena na oblast přenosových jevů s důrazem na přenos vlhkosti a s tím spojený i přenos tepla. Přenos tepla a vlhkosti patří mezi základní mechanismy ovlivňující vnímání komfortu při nošení oděvů, tvoří tedy nedílnou součást při hodnocení komfortních vlastností samotných textilií. Jejich vzájemný vztah podrobně popisuje třetí kapitola. Součástí této kapitoly je i rešerše odborných studií ostatních autorů především v oblasti hodnocení termofyziologického komfortu textilií. Následuje čtvrtá kapitola, která pojednává o sorpčních vlastnostech textilních materiálů. Součástí teoretické části je i rozsáhlá rešeršní část v kapitole páté, která podrobně popisuje problematiku hodnocení procesu sušení ve vztahu ke komfortním vlastnostem textilních materiálů včetně zhodnocení dostupných metodik či norem.

Experimentální část začíná návrhem a realizací nového měřicího zařízení. Nové měřicí zařízení odstraňuje nedostatky stávajících metod. Zejména umožňuje měřit úbytek vlhkosti v textiliích gravimetrickým způsobem za izotermních podmínek v nastavených časových intervalech. Zároveň lze regulovat rychlost proudění přímo nad měřeným vzorkem a díky zabudovanému zvedacímu elementu je zcela eliminovaná odchylka, kterou by způsobilo právě ofukování měřeného vzorku. Izotermní podmínky měření jsou zajištěny zabudovaným hliníkovým žebrem s přidavnými ventilátory. Tento způsob měření se v současných metodikách nevyskytuje.

Dílčí cíle disertační práce je možné rozdělit do následujících bodů a jsou součástí kapitoly sedmé a osmé:

- Porovnání metod vlhčení vzorků A a B.
- Vyhodnocení vlivu rychlosti proudění nad měřenými vzorky.
- Porovnání izotermních a neizotermních podmínek měření vzhledem k rychlosti sušení.
- Porovnání výsledků z nového přístroje s naměřenými daty z přístroje MMT.
- Vliv obsahu přidané vlhkosti v textiliích na termofyziologický komfort uživatele včetně subjektivního hodnocení suchosti či vlhkosti textilie (osmá kapitola).

Poslední osmá kapitola velmi úzce souvisí s kapitolou sedmou a slouží jako podklad pro hodnocení sušících křivek se vztahem k termofyziologickému komfortu vlhkých textilií.

## 2 Přenosové jevy

Přenosové jevy zahrnují sdílení hybnosti (mechanika tekutin), sdílení hmoty (difuze) a sdílení energie (vedení tepla, konvekce a sálání) [1].

Pro pochopení a zjednodušení problematiky přenosových jevů se zanedbává molekulární nespojitá struktura látek a je považována za kontinuum (spojité prostředí), které je ve většině případů izotropické. Následné změny veličin lze vyjádřit diferenciálem funkce prvního řádu [2].

K řešení jednotlivých úloh z přenosových jevů existují dva typy metod, a to metody analytické a metody experimentální. První jmenované jsou kvůli transportu v proudící tekutině značně náročné na výpočet a jejich výsledkem je matematická rovnice s řešením v obecném tvaru, či numerický výpočet. Oproti tomu metody experimentální vycházejí z empirického přístupu, kdy je nutné kvůli nemožnosti změření některých úloh zavést i teorie podobnosti a metody modelování [2].

Díky experimentálním metodám lze predikovat chování reálných objektů pomocí měření modelů v laboratoři. Tyto jevy však musí splňovat určitou podobnost a mít podobné podmínky jednoznačnosti. Fyzikální podobnost se týká jevů, které lze vyjádřit rovnicemi stejného tvaru. Oproti tomu analogická podobnost označuje podobnost dějů, které lze vyjádřit rovnicemi stejné formy, ale rozdílného obsahu, což jsou právě výše zmíněné základní zákony molekulárního přenosu hybnosti, tepla a hmoty [2].

Z podmínek fyzikální podobnosti vyplývají veličiny, které určují danou podobnost. Jedná se o tzv. bezrozměrná kritéria podobnosti, která můžeme dále rozdělit na určující neboli vymezující příslušný děj (například pro přenos tepla konvekcí: Prandtlovo, Grashofovo či Reynoldsovo číslo) a určená (například Nusseltovo číslo), díky kterým lze najít hledanou veličinu. Jejich vzájemný vztah bývá označován jako kritériální rovnice. Konkrétní parametry v kritériální rovnici jsou určeny kombinací analytických a experimentálních metod [2].

Jednotlivé mechanismy přenosu jsou spojeny s pohybem molekul, který zahrnuje kmitání částic bez přemísťování (v tuhých látkách se jedná o kondukcí, v neproudících kapalinách o difuzi), s prouděním molekul s mikrostrukturou laminární či turbulentní a s elektromagnetickým vlněním (zářením = radiací) [3].

Pro matematický popis transportních jevů v proudící tekutině je třeba využít spojení zákonů o zachování hmoty, hybnosti (2. Newtonův zákon) a energie (1. Zákon termodynamiky) společně se zákony přenosových dějů pomocí makroskopických veličin. K nim patří: Newtonův zákon pro tečné napětí ve viskózní tekutině, Fourierův zákon vedení tepla a Fickův zákon difuze hmoty v binární soustavě [4]. Mechanismus přenosových jevů lze vyjádřit jako molekulární přenos (s pohybem molekul), konvektivní přenos (s prouděním molekul) a přenos tepla zářením (radiací) [3].

Ve všech třech případech je hustota toku úměrná záporné hodnotě gradientu dané makroskopické proměnné. Součinitele přenosu zahrnují fyzikální vlastnosti, závislé především na látce, teplotě a tlaku okolí [1].

Obecně lze tedy vyjádřit tok přenášené veličiny jako součin součinitele daného přenosu a gradientu pole přenosu. Mezi přenosem hybnosti, energie a hmoty tedy platí analogický vztah [3]. V některé literatuře [2] se užívá pro součinitele přenosu společný název „difuzivita“ (hybnostní, tepelná a hmotnostní). V závislosti na teplotě a tlaku lze hodnoty jednotlivých součinitelů nalézt v příslušných tabulkách [2].

V následujících kapitolách budou vyjádřeny a popsány základní způsoby přenosu a nejdůležitější zákony přenosových jevů a jejich analogie.

## 2.1 Molekulární přenos

Molekulární přenos zahrnuje Newtonův zákon proudění (konvekce) v tekutinách podle rovnic (1) a (2) Fouriérův zákon vedení (kondukce) tepla podle rovnic (3), (4), (5) a Fickův zákon difuze hmoty podle rovnice (6) [2].

### 2.1.1 Newtonův zákon proudění v tekutinách

Dle Newtonova zákona viskozity (1) je smykové (tečné) napětí  $\tau_{yx}$  přímo úměrné záporně vzatému gradientu rychlosti. Součinitelem úměrnosti je dynamická viskozita  $\eta$  [4]. Podrobněji se viskozitou čistých kapalin a plynů zabývá ve své knize například Bird a spol. [1].

Tekutiny, jejichž proudění lze popsat uvedeným Newtonovým zákonem vnitřního tření podle rovnice (1), nazýváme newtonské tekutiny [3].

$$\tau_{yx} = -\eta \cdot \frac{dv}{dy} \quad (1)$$

Pro vysvětlení analogie mezi jednotlivými přenosy se používá Newtonova rovnice (2), která vyjadřuje měrný tok hybnosti.

$$\tau_{yx} = -\nu \cdot \frac{d(\rho \cdot v)}{dy} \quad (2)$$

Součinitelem přenosu hybnosti je zde kinematická viskozita  $\nu$ , která vyjadřuje dynamickou hustotu vztaženou na hustotu tekutiny  $\rho$  [4].

V některé odborné literatuře [4] se setkáme s pojmem koncentrace hybnosti, který souhrnně označuje součin hustoty tekutiny a rychlosti.

### 2.1.2 Fourierův zákon vedení tepla

Sdílení tepla vedením (kondukcí) je způsob přenosu, při kterém se teplo šíří v makroskopicky nehybném prostředí na základě interakce molekul. Vedení tepla se uskutečňuje především v pevných tělesech a v nepohybujících se kapalinách (v úzké mezeře, v malých dutinách či například v blízkosti stěny) [2].

Fourierův zákon říká, že plošná hustota tepelného toku dle rovnice (3) je přímo úměrná záporně vzatému gradientu teploty [1]. Součinitelem úměrnosti tepla je zde měrná tepelná vodivost  $\lambda$  [3].

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

Analogicky k přenosu hybnosti je zde součinitelem přenosu tepla teplotní vodivost  $a$  definovaná dle vztahu (4), kde  $\rho$  vyjadřuje hustotu a  $c_p$  označuje měrnou tepelnou kapacitu [3].

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \quad (4)$$

Upravená rovnice plošné hustoty tepelného toku získá tvar (5), kde součin  $\rho \cdot c_p \cdot T$  představuje koncentraci tepelné energie a má rozměr tepelné energie vztažené na jednotku objemu [4].

$$\dot{q} = -a \cdot \frac{d(\rho \cdot c_p \cdot T)}{dx} \quad (5)$$

### 2.1.3 Fourierova-Kirchhoffova diferenciální rovnice vedení tepla

Homogenní neomezenou rovinnou stěnou (jejíž povrchy jsou udržovány na rozdílných teplotách) prochází tedy dle Fourierova zákona tepelný tok dle rovnice (6).

$$\dot{Q} = \lambda \cdot \frac{T_1 - T_2}{l_s} \cdot S \quad (6)$$

Kde veličiny  $T_1$  a  $T_2$  označují teploty povrchů stěny,  $l_s$  tloušťku stěny a  $S$  povrch stěny. Pro vyjádření rozložení teplot v prostoru v závislosti na souřadnicích a čase je nutné zmínit diferenciální rovnici vedení tepla [3].

Fourierova-Kirchhoffova diferenciální rovnice vedení tepla tedy popisuje nestacionární vedení tepla v prostoru. Pro její odvození je nutné určit si pevnou kontrolní oblast, ze které vytkneme hranol o rozměrech  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  [2].

Při odvozování rovnice se vychází ze zákona o zachování energie (1. zákon termodynamiky), který určuje princip zachování či přeměny energií. Pokud nedochází k fázovým změnám, platí tvar podle rovnice (7), v případě, že uvažujeme charakteristiky materiálu jako konstantní, můžeme rovnici upravit na tvar (8) [2].

$$\frac{\partial I}{\partial t} = \frac{\partial \cdot (\rho \cdot dV \cdot c_p \cdot T)}{\partial t} = d\dot{Q}_{\text{vedení}} + d\dot{Q}_{\text{zdroje}} \quad (7)$$

$$\frac{\partial I}{\partial t} = \rho \cdot dV \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = d\dot{Q}_{\text{vedení}} + d\dot{Q}_{\text{zdroje}} \quad (8)$$

kde  $\partial I$  je změna měrné entalpie,  $\rho$  je hustota materiálu,  $dV$  je elementární objem a  $c_p$  označuje měrnou tepelnou kapacitu. Při odvozování rovnice vycházíme z elementárních tepelných toků v jednotlivých směrech podle rovnic (9) a (10) [2].

$$d\dot{Q}_x = -\lambda_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot dS = -\lambda_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot dy \cdot dz \quad (9)$$

$$\begin{aligned} d\dot{Q}_{x+dx} &= d\dot{Q}_x + \frac{\partial}{\partial x} \cdot (d\dot{Q}_x) \cdot dx \\ &= d\dot{Q}_x + \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( -\lambda_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot dy \cdot dz \right) \cdot dx \end{aligned} \quad (10)$$

Pokud tyto dva toky od sebe odečteme dle rovnice (11), získáme změnu akumulované energie vedením tepla ve směru osy x, analogicky platí i pro ostatní směry podle rovnice (12) [2].

$$\begin{aligned} d\dot{Q}_x - d\dot{Q}_{x+dx} &= d\dot{Q}_x - \left[ d\dot{Q}_x + \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( -\lambda_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot dy \cdot dz \right) \cdot dx \right] \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( \lambda_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) \cdot dV \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} d\dot{Q}_{\text{vedením}} &= \dot{q}_{\text{zdroje}} \cdot dV \\ &= \left[ \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( \lambda_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left( \lambda_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left( \lambda_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \cdot dV \end{aligned} \quad (12)$$

Dosadíme-li změnu tepla akumulovaného vedením a působení vnitřních zdrojů do rovnice (12), která vyjadřuje časovou změnu entalpie, a podělíme ji elementárním objemem  $dV$ , získáme základní tvar diferenciální rovnice vedení tepla (13) [2].

$$\begin{aligned} \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( \lambda_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left( \lambda_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left( \lambda_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ &\quad + \dot{q}_{\text{zdroje}} \end{aligned} \quad (13)$$



Tato rovnice platí i pro neizotropní a nehomogenní látky (u nich závisí  $\lambda$  na teplotě, souřadnicích i směru odpovídajících os). Pro látky izotropní se upravuje na tvar (14).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{q}_{zdroje}}{\rho \cdot c_p} = a \cdot \nabla^2 T + \frac{\dot{q}_{zdroje}}{\rho \cdot c_p} \quad (14)$$

Kde  $a$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ] je tzv. součinitel teplotní vodivosti a  $\nabla^2 T$  je Laplaceův operátor teploty [2].

### 2.1.3.1 Podmínky jednoznačnosti řešení úloh přestupu tepla

Aby bylo možné určit řešení úlohy z přenosových jevů, je nutné vymezit konkrétní děj pomocí podmínek jednoznačnosti. Mezi ně patří geometrické podmínky (tj. tvar a rozměr prostoru, ve kterém děj probíhá), fyzikální podmínky (zahrnují vlastnosti látek), počáteční podmínky (popisují stav na počátku děje) a podmínky okrajové [2].

Při stacionárním přenosu tepla je akumulace tepla nulová. Pokud v tuhém tělese nepůsobí objemový zdroj, je řešení dáno rovnicí (15).

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (15)$$

Při řešení nestacionárních teplotních polí je nutné znát počáteční podmínky a účinek okolí na povrch tělesa, což vymezují podmínky označené jako okrajové či mezní. Počáteční podmínka se určuje zadáním teplotního pole v tělese na počátku děje podle rovnice (16), u rovnoměrného rozložení teplot je konstantní [5].

$$T = f(x, y, z, t) \quad (16)$$

#### Okrajová podmínka 1. druhu = Dirichletova

Tato podmínka popisuje teplotu na hranici úlohy (obvykle na povrchu tělesa) v libovolném čase podle rovnice (17). Speciálním případem může být konstantní teplota v čase na povrchu tělesa, či časově i prostorově konstantní podmínka. Při nestacionárním ohřevu se mění směrnice teplotního povrchu i tepelný tok [5].

$$T_s = f(x_s, y_s, z_s, t) \quad (17)$$

#### Okrajová podmínka 2. druhu = Neumannova

Je zadán tepelný tok na povrchu tělesa, nebo pokud známe derivaci teploty na hranici úlohy v libovolném čase, což souvisí s plošnou hustotou tepelného toku (viz. Fourierův zákon), můžeme proto tuto podmínku zapsat ve formě rovnice (18).

U dokonale izolovaného povrchu (adiabatický děj) bude nulová hustota tepelného toku a tím pádem bude průběh teplot kolmý k povrchu podle rovnice (19) [5].

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \dot{q}_s = \dot{q}_s(x_s, y_s, z_s, t) \quad (18)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \quad (19)$$

### Okrajová podmínka 3. druhu = Robinova

Pokud známe teplotu tekutiny, která dané těleso obklopuje, můžeme na jeho povrchu definovat okrajovou podmínku na základě rovnosti hustoty toku tepla konvekcí mezi povrchem a tekutinou a toku tepla vedením ve stěně v blízkosti daného povrchu podle rovnice (20) [5].

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha (T_\infty - T_s) \quad (20)$$

### Vnitřní podmínka při styku dvou těles

V odborné literatuře bývá často zmíněna ještě tzv. 4. podmínka podle vztahu (21), která se týká styku dvou těles. U dokonalého styku dvou těles o různých vodivostech platí podmínka spojitosti teplotních povrchů a neexistuje mezi nimi tepelný odpor [4] [5].

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \quad (21)$$

Pokud je však styk dvou těles nedokonalý, vzniká mezi nimi ještě tepelný odpor díky hmotě, která vyplňuje nerovnosti obou povrchů [4] [5].

### 2.1.4 Fickův zákon difuze hmoty

Dle prvního Fickova zákona je měrný hmotnostní tok složky A označený jako  $\dot{m}$  ve směru  $x$  v binárním systému složek A a B úměrný záporně vzatému gradientu koncentrace podle rovnice (22). Součinitelem přenosu je zde molekulární difuzivita (difuzní součinitel)  $D_{AB}$  [1].

$$\dot{m} = -D_{AB} \cdot \frac{dC_A}{dx} \quad (22)$$

Tento vztah platí pokud se jedná o obousměrnou difuzi, tj. koncentrace obou složek se vzájemně vyrovnávají. V případě přenosu vlhkosti z volné hladiny představuje volná hladina pro molekuly vzduchu určitou bariéru. Částice vzduchu naráží na volnou hladinu, kde se nasytí vodní parou a následně se vrací zpět do okolního vzduchu.

V případě jednosměrné difuze se vztah (22) upraví pomocí tzv. Stefanovy korekce, protože se vlhkost přenáší do vzduchu s větší intenzitou než při normální binární difuzi [2].

### 2.1.5 Analogie molekulárních přenosových jevů

Společným mechanismem výše uvedených přenosových jevů je neuspořádaný pohyb molekul, proto platí v případě jednorozměrných systémů analogie a vztahy mezi jednotlivými jevy lze vyjádřit pomocí bezrozměrných kritérií [3].

Rovnice (23, 24, 25) popisují vztahy mezi součiniteli přenosu  $\nu$ ,  $a$ ,  $D_{AB}$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ], které vyjadřují fyzikální vlastnosti tekutin závislé na teplotě a tlaku a na složení směsí tekutin [3].

Prandtlovo číslo  $Pr$  popisuje vztah mezi polem rychlostí a polem teplot podle vztahu (23). Při brzdění proudu viskózními silami se mění pohybová energie v teplo, proto teplota plynu se zvyšuje směrem k povrchu tělesa a dochází tak k aerodynamickému ohřevu. U většiny plynů je Prandtlovo kritérium menší než jedna, což značí, že při ustáleném proudění mají tělesa nižší teplotu povrchu, než je klidová teplota [4].

Lewisovo číslo  $Le$  popisuje jevy, u kterých dochází přívodem tepla i k molekulovému přenosu hmoty, viz rovnice (24). Mezi ně patří například: vypařování, sublimace, destilace, absorpce, kondenzace, hoření, a jiné [4]. Schmidtovo číslo  $Sc$  vyjadřuje vztah (25) mezi polem rychlostí a polem koncentrací [4].

Vzájemný vztah mezi jednotlivými podobnostními čísly vyjadřuje rovnice (26).

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (23)$$

$$Le = \frac{a}{D_{AB}} \quad (24)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D_{AB}} \quad (25)$$

$$\frac{Pr \cdot Le}{Sc} = 1 \quad (26)$$

Molekulární mechanismus přenosu se v proudící tekutině uplatní pouze při laminárním proudění, v případě proudění turbulentního dochází k neuspořádanému promíchávání makročásteček tekutiny a součinitelé přenosu nejsou látkovými parametry, ale závisí především na proudění v daném místě [3].

## 2.2 Konvekce

Konvekce neboli proudění se vyskytuje v nucené nebo přirozené formě. Nucená konvekce je podmíněna například ventilátorem, oproti tomu volná konvekce vzniká v důsledku rozdílných teplot stěny a tekutiny. U volné konvekce je důležitá část tepelného toku sdílena také sáláním [1].

Konvektivní přenos probíhá pomocí proudění molekul či jejich shluků. Dle jeho mikrostruktury lze proudění rozdělit na laminární, turbulentní nebo přechodovou oblast. Týká se tekutin, neexistuje v čisté formě, ale je vždy doprovázeno vedením tepla, které se uskutečňuje buď uvnitř tekutiny, nebo na rozhraní pevného tělesa a tekutiny [3].

### 2.2.1 Přenos tepla konvekcí

K přenosu tepla konvekcí dochází při výskytu gradientu teplot v tekutině a řídí se Newtonovým ochlazovacím zákonem podle vztahu (27). Plošná hustota tepelného toku  $\dot{q}$  je úměrná rozdílu teplot  $\Delta T$  tělesa a tekutiny mimo mezní vrstvu [3].

$$\dot{q} = \alpha \cdot \Delta T \quad (27)$$

Přenos tepla prouděním je fyzikálně složitý děj, který je ovlivněn kromě teploty stěny a tekutiny řadou dalších faktorů. Mezi ně patří: rychlost proudění, geometrie teplosměnné plochy, vlastnosti tekutiny atd. Všechny tyto parametry vystihuje součinitel přestupu tepla  $\alpha$ , který je funkcí výše uvedených vlastností [5].

Obecně lze přenos tepla popsat kritériální rovnicí (28), ve které Nusseltovo číslo  $Nu$  obsahuje právě hledaný součinitel přestupu tepla  $\alpha$  podle vztahu (29). Tento vztah je funkcí Reynoldsova, Grashofova a Prandtlova kritéria. Nusseltovo číslo vyjadřuje poměr konvektivního a konduktivního přenosu tepla kolmo na uvažovanou hranici tekutiny. Koeficienty  $C$ ,  $k$ ,  $l$  a  $m$  v tomto případě zastupují parametry rovnic a vychází z kombinace analytických a experimentálních metod [2].

$$Nu = f(Re, Gr, Pr) = C \cdot Re^k \cdot Gr^l \cdot Pr^m \quad (28)$$

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} \quad (29)$$

Z hlediska příčiny můžeme konvekci rozdělit na přirozenou, která vzniká v důsledku nerovnoměrně rozděleného teplotního pole a nucenou konvekci, kterou způsobí vnější příčina (ventilátor, čerpadlo, vítr) [3].

Není-li možné na první pohled určit, který druh konvekce převládá, lze se orientovat dle tzv. Archimédova čísla  $Ar$  vypočítané ze vztahu (30). Archimédovo číslo je dané velikostí poměru vztlačových sil určených Grashofovým číslem  $Gr$  a setrvačných sil určených Reynoldsovým číslem  $Re$ . Pokud je Archimédovo číslo výrazně menší než 1, dochází k nucené konvekci, je-li výrazně větší, převládají vztlačové síly a můžeme říci, že se jedná o konvekci přirozenou. Jsou-li vztlačové a setrvačné síly v rovnováze, dochází ke smíšené konvekci [2].

Výpočty Reynoldsova a Grashofova čísla jsou uvedeny v rovnicích (31) a (32), kde  $v$  značí rychlost proudění tekutiny,  $L$  označuje charakteristický rozměr tělesa,  $\vartheta$  kinematickou viskozitu,  $g$  tíhové zrychlení,  $\beta_T$  teplotní roztažnost tekutiny,  $\Delta T$  rozdíl teploty stěny a tekutiny [2].

$$Ar = \frac{Gr}{Re^2} \quad (30)$$

$$Re = \frac{v \cdot L}{\vartheta} \quad (31)$$

$$Gr = \frac{g \cdot L^3 \cdot \beta_T \cdot \Delta T}{\vartheta^2} \quad (32)$$

Pro správný výpočet přestupu tepla je nutné specifikovat, jedná-li se o konvekci ve volném neohraničeném prostoru, či o konvekci v ohraničeném prostoru, např. mezi skly. Neméně důležitým faktorem, který ovlivňuje přestup tepla při konvekci je i režim proudění, a to laminární nebo turbulentní. U nucené konvekce lze druh proudění určit dle Reynoldsova čísla  $Re$ , u přirozené konvekce pak podle součinu Grashofova a Prandtlova čísla dle vztahu (33), který se nazývá Rayleighovo číslo  $Ra$  [2].

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (33)$$

Podle charakteristického rozměru obtékaného tělesa a jeho geometrie se liší i kritické hodnoty jednotlivých podobnostních čísel, lze je nalézt v příslušné literatuře [1, 3, 5] a jiné. Dle Birda a kol. [1] existují 3 konvenční definice přestupu tepla v tekutině pro celou ohřívanou část, které se liší především určením rozdílu teplot, resp. jejím výpočtem. Podrobnější rozbor však přesahuje problematiku této práce a lze jej nalézt například v literatuře [1, 6, 7].

### 2.2.1.1 Volná konvekce v neomezeném prostoru

Při volné konvekci do neomezeného prostoru se tvar kritériální rovnice (28) upraví na tvar rovnice (34). Veličiny  $K$  a  $n$  zde označují koeficienty, které závisí na součinu Grashofova a Prandtlůva čísla. Jejich hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2. Tyto hodnoty se u každého autora lehce liší, například Bird a spol. ve své knize [1] uvádí hodnoty  $K = 0,525$  pro vodorovnou trubku a u svislé desky  $K = 0,59$ , které platí pro součin  $Gr$  a  $Pr$  vycházející mezi  $10^4$ – $10^9$ . Jiné hodnoty (tab. 1) uvádí ve své práci Barták [2].

$$Nu = K \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad (34)$$

Tab. 1 Hodnoty konstant  $K$  a  $n$  [2] [8]

$Ra = Gr \cdot Pr$	$K$	$n$
$<10^3$	0.5	0
$10^3 - 5 \cdot 10^2$	1,18	0,125
$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25
$2 \cdot 10^7 - 10^{14}$	0,135	0,25

Dle Nusseltova kritéria lze následně odvodit i součinitel přenosu tepla prouděním podle rovnice (22) [8].

U vodorovných desek se vypočtený součinitel přestupu tepla ještě upravuje dle toho, jaký povrch (zda horní či dolní) je ohříván [8].

### 2.2.1.2 Volná konvekce v omezeném prostoru

Jako proudění v omezeném prostoru nazýváme stav, jestliže se v omezeném prostoru vzájemně ovlivňuje proudění okolo ohřívané a okolo chlazené plochy. Přestup tepla skrz kapalinu pak popisujeme nerozděleně dohromady pomocí tzv. ekvivalentní měrné tepelné vodivosti  $\lambda_{ekv}$ . Tepelný tok se počítá ze stejného vztahu jako při vedení tepla stěnou podle rovnice (3). Ekvivalentní měrnou tepelnou vodivost  $\lambda_{ekv}$  lze spočítat z rovnice (35) [3].

$$\lambda_{ekv} = \lambda \cdot \left[ 1 + \frac{m \cdot Ra^n}{K + Ra} \right] \quad (35)$$

Hodnoty  $K$ ,  $m$  a  $n$  závisí na geometrii mezery a směru toku tepla a jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2 Hodnoty konstant  $K$ ,  $m$  a  $n$  [3]

Mezera a tok tepla	$K$	$m$	$n$
vodorovná mezera, tok tepla směrem vzhůru	$3,2 \cdot 10^3$	0,07	1,333
svislá mezera	$10,1 \cdot 10^3$	0,0236	1,393
šikmá mezera 45° - tok tepla směrem vzhůru	$4,1 \cdot 10^3$	0,043	1,36
šikmá mezera 45° - tok tepla směrem dolů	$13 \cdot 10^3$	0,025	1,36

Tepelný tok pak lze spočítat dle vztahu (36), kde  $\delta$  je tloušťka vzduchové mezery a  $\Delta T$  [K] rozdíl teplot [3].

$$\dot{q} = \frac{\lambda_{ekv}}{\delta} \cdot \Delta T \quad (36)$$

### 2.2.1.3 Nucená konvekce

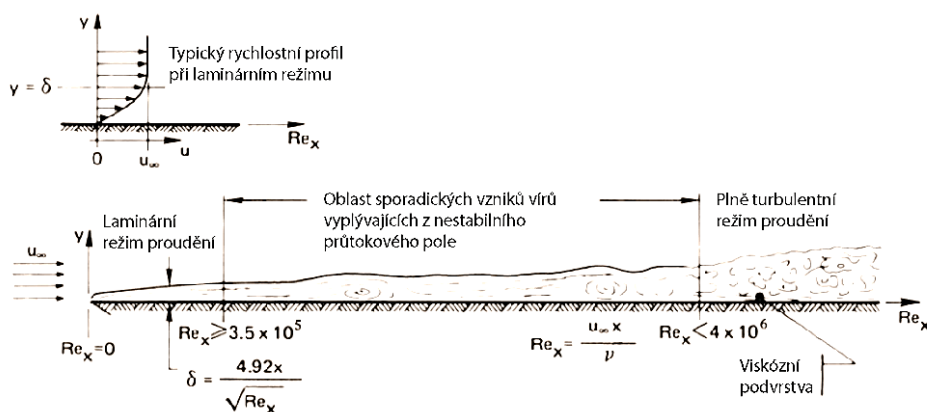
Při nuceném obtékání tělesa vznikají mezní vrstvy hybnostní a tepelná, jejich tloušťky nejsou stejné, avšak plošná hustota tepelného toku vedením vrstvou tekutiny u stěny musí být shodná s velikostí hustoty toku tepla odvedeného konvekcí. Kromě experimentálních metod lze režim proudění určit výpočtem kritické hodnoty tzv. Reynoldsova čísla. Toto číslo přímo závisí na charakteristickém rozměru (u trubek je to většinou jejich průměr, u vodorovných desek délka ve směru proudění, atd.), na náběhové rychlosti tekutiny a nepřímo závisí na kinematické viskozitě tekutiny. Podle výpočtu kritické hodnoty Reynoldsova čísla (dále jen  $Re_x$ ) lze určit pravděpodobný režim proudění [3].

Zjednodušeně lze říci, že u nucené konvekce v trubkách či v mezerách mezi deskami se pro kritickou hodnotu  $Re_x$  nižší než 2300 jedná vždy o proudění laminární, Liendhart ve své publikaci [5] uvádí hranici 2100. Pokud je kritická hodnota  $Re_x$  vyšší než 5000, platí turbulentní režim proudění. Oblast mezi těmito druhy proudění se nazývá přechodová [3] [5].

V přiměřeně pečlivém experimentu může být laminární tok vytvořen tak, aby přetrvával až do hodnoty  $Re_x = 10^4$  [5].

V případě vodorovných desek s ostrou náběžnou hranou je kritická hodnota  $Re_x$  vyšší, cca  $10^5$  [9].

Na obrázku 1 je znázorněna tekutina proudící přes desku s ostrou náběžnou hranou. Tok je laminární až do přechodného  $Re_x$  na základě délky desky (L), jak je patrné z obrázku 1. V tomto obrázku označuje rychlost proudění veličina  $u$ .



Obr. 1 Mezní vrstva na desce s ostrou náběžnou hranou [5]

Při větších hodnotách charakteristického rozměru vykazuje mezní vrstva sporadické vírové nestability v poměrně dlouhém rozmezí a nakonec přechází do plně turbulentního režimu [5].

Pro znázorněnou hraniční vrstvu je kritická hodnota  $Re_x = 3,5 \cdot 10^5$  [5] [9]. Obecně je však hodnota  $Re_x$  silně závislá na množství turbulence v toku proudícím přes desku, na přesném tvaru náběžné hrany, drsnosti stěny a přítomnosti akustických nebo strukturních vibrací. Na ploché desce zůstane mezní vrstva laminární, i když jsou vibrace velmi velké, pokud je  $Re_x$  nižší nebo rovno  $6 \cdot 10^4$  [5].

Při relativně nenarušených podmínkách dochází k přechodu pro  $Re_x$  v rozmezí  $3 \cdot 10^5$  až  $5 \cdot 10^5$  a ve velmi pečlivých laboratorních experimentech může být turbulentní přechod zpožděn až do  $Re_x \approx 3 \cdot 10^6$  [5].

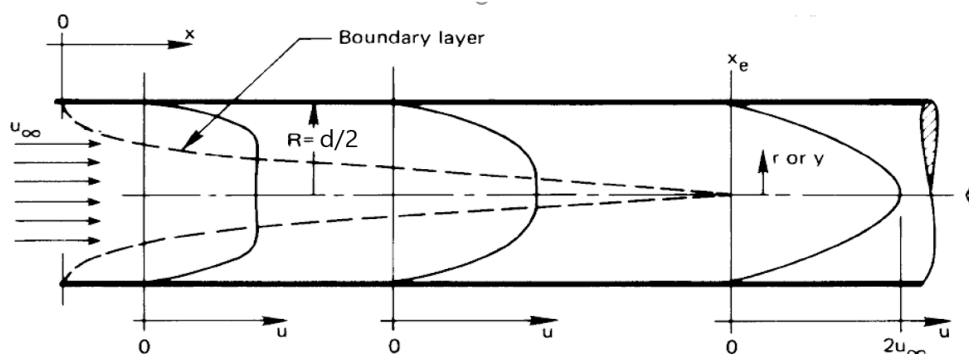
**Přestup tepla při laminárním proudění trubkou** je určen vztahy (37) a (38). V literatuře lze nalézt více tvarů kritériálních rovnic pro jednotlivé případy. Například Barták ve své práci [2] uvádí tvar Nusseltova kritéria (37), Kolat uvádí ve své práci [4] tvar (38). Obě dvě rovnice obsahují tzv. Sieder – Tatův korekční člen  $\left(\frac{\eta}{\eta_s}\right)^{0,14}$  pro kapaliny s vyšší závislostí dynamické viskozity na teplotě.

$$Nu = \left[ 3,65 + \frac{0,0668 \cdot \left( Re \cdot Pr \cdot \frac{d}{L} \right)}{1 + 0,045 \cdot \left( Re \cdot Pr \cdot \frac{d}{L} \right)^{\frac{2}{3}}} \right] \cdot \left( \frac{\eta}{\eta_s} \right)^{0,14} \quad (37)$$

$$Nu = 1,86 \cdot \left( Re \cdot Pr \cdot \frac{d}{L} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left( \frac{\eta}{\eta_s} \right)^{0,14} \quad (38)$$

Podmínkou platnosti předchozích rovnic je:  $Re < 2300$  a  $10^{-1} < (Re \cdot Pr \cdot d/L) < 10^{-4}$ .

Následující obrázek 2 zobrazuje vývoj laminárního profilu v trubkách, kde  $d$  označuje průměr a  $R$  poloměr.



Obr. 2 Vývoj laminárního rychlostního profilu v trubce [5]



**Přestup tepla při přechodovém a turbulentním proudění trubkou [2]** je dán vztahem.

$$Nu = 0,116 \cdot \left( Re^{\frac{2}{3}} - 125 \right) \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \left[ 1 + \left( \frac{d}{L} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \cdot \left( \frac{\eta}{\eta_s} \right)^{0,14} \quad (39)$$

Platnost rovnice (39) je omezena na  $L/d > 1$ ,  $2300 < Re < 10^6$  a  $0,6 < Pr < 500$ .

**Přestup tepla při kolmém obtékání trubky nebo rotačního válce [2]** je určen obecným tvarem Nusseltova kritéria (40).

$$Nu = K \cdot Re^m \cdot Pr^n \quad (40)$$

Hodnoty konstant  $K$ ,  $m$  a  $n$  závisí na hodnotě  $Re$ . V literatuře se lze setkat s různými hodnotami, které jsou kombinací experimentálních a analytických metod. Například Barták [2] ve své práci uvádí následující hodnoty uvedené v tabulce 3.

Tab. 3 Hodnoty konstant  $K$ ,  $m$  a  $n$  [2]

Reynoldsovo číslo	$K$	$m$	$n$
1 – 4	0,99	0,305	0,31
4 – 50	0,86	0,41	0,31
50 – 1000	0,69	0,47	0,31
1000 – $5 \cdot 10^3$	0,665	0,47	0,31
$5 \cdot 10^3$ – $5 \cdot 10^4$	0,22	0,6	0,31
$> 5 \cdot 10^4$	0,026	0,8	0,36

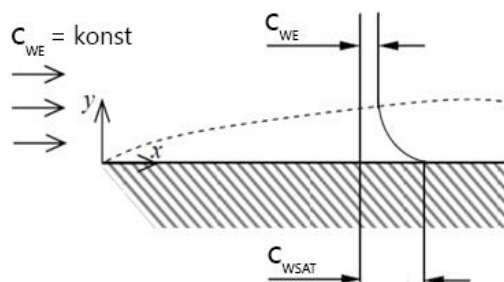
Z hodnoty Nusseltova čísla se následně opět odvodí součinitel přenosu tepla prouděním podle rovnice (29) [2, 8].

### 2.2.2 Přenos vlhkosti konvekcí

Přesto, že se mechanismus difuze uplatní u přenosu vlhkosti vždy, bývá často ve většině případů přehlušen konvektivním přenosem. Základní kritériální rovnice pro výpočet součinitele přenosu vlhkosti (Sherwoodovo kritérium) a součinitele přenosu tepla (Nusseltovo kritérium) mají proto obdobný tvar. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2.1, Nusseltovo kritérium je funkcí čísel Prandtlůva, Reynoldsova a Grashoffova dle rovnice (28). Oproti tomu Sherwoodovo kritérium je funkcí čísla Schmidtova, Reynoldsova a Grashoffova dle rovnice (41) [3].

$$Sh = f(Re, Gr, Sc) \quad (41)$$

Sherwoodovo číslo lze tedy chápat jako bezrozměrný gradient koncentrace na stěně [2].



Obr. 3 Nucená konvekce vlhkosti na vodorovné desce [2]

Obrázek 3 znázorňuje obtékání vodorovné desky proudem vzduchu, ze které se uvolňuje vlhkost v podobě páry. Koncentrace vodní páry v nabíhájícím proudě vzduchu je stále stejná a není ovlivněna uvolňováním vlhkosti z desky. Na povrchu desky je tedy koncentrace vodní páry  $C_{WSAT}$  vyšší než koncentrace  $C_{WE}$  v jiném místě proudu vzduchu [2].

Tato část, kde se mění koncentrace vodní páry z hodnoty na povrchu desky na hodnotu v proudě vzduchu, se nazývá mezní vrstva. Díky vazkosti vzduchu dochází k ulpívání nehybné mikroskopické vrstvy vzduchu přímo na povrchu desky. Tuto vrstvu nehybného vzduchu musí vlhkost překonat pomocí difuze, aby mohla být následně přenášena mechanismem konvekce [2].

Proto platí na stěně rovnost hustoty toku difuzí a konvekci podle rovnice (42).

$$D_C \frac{dC}{dy} \Big|_{y=0} = \beta_C \cdot (C_{WSAT} - C_{WE}) \quad (42)$$

Stejně jako u konvekce tepla jsou hodnoty součinitelů přenosu vlhkosti závislé na příčině proudění (přirozené či nucené), na rychlosti a na mikrostruktuře proudění (laminární či turbulentní) [2, 3]. Pro nucenou konvekci jsou určující kritéria Schmidtovo a Reynoldsovo, pro přirozenou pak kritérium Schmidtovo a Grashofovo [1, 2]. Podobně jako u Newtonova zákona přenosu tepla prouděním se z kritériální rovnice určí součinitel přenosu vlhkosti  $\beta_C$ . Měrný hmotnostní tok vlhkosti lze tedy spočítat podle rovnice (43), (45). Vztah mezi  $\beta_p$  a  $\beta_C$  vyjadřuje rovnice (44), která vychází ze stavové rovnice ideálního plynu [3, 10].

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \beta_p \cdot (p_{pWSAT} - p_{pWE}) = \beta_C \cdot (C_{WSAT} - C_{WE}) \\ &= \beta_x \cdot (x_{WSAT} - x_{WE}) \end{aligned} \quad (43)$$

$$\beta_p = \frac{\beta_C}{r \cdot T} = \beta_x \cdot \frac{0,622}{p} \quad (44)$$

$$\beta_c = \frac{Sh \cdot D_c}{b_1} \quad (45)$$

Koeficient přestupu vlhkosti je přímo úměrný rychlosti proudění vzduchu stejně jako koeficient přestupu tepla prouděním  $\alpha$ . Vzhledem k analogii mezi přenosem tepla a vlhkosti, může být koeficient přestupu vlhkosti prouděním  $\beta_x$  (který je vztažen k měrným vlhkostem) počítán pro nižší rychlosti podle Lewisova zákona podle rovnice (46), kde  $c_{pA}$  označuje měrnou tepelnou kapacitu, nebo-li specifické teplo vlhkého vzduchu [3, 10].

$$\beta_x = \frac{\alpha}{c_{pA}} \quad (46)$$

Při dostatečném gradientu hnací síly se odparem vlhkosti odvede z povrchu tepelný tok dle rovnice (47), kde  $l_v$  značí výparné teplo vody, které má při teplotě 20 °C hodnotu přibližně 2,5 MJ·kg<sup>-1</sup> [11].

$$\dot{q} = \dot{m} \cdot l_v \quad (47)$$

## 2.3 Přenos tepla radiací

Kromě vedení a proudění dochází k přenosu tepla také radiací (zářením) a oproti předchozím dvěma způsobům není přenos tepla mezi tělesy vázán na přítomnost látky mezi tělesy. Naopak lze říci, že jakákoliv přítomnost hmoty představuje určitou bariéru pro přenos tepla. Teplo se tedy radiací nejlépe přenáší ve vakuu [1, 2, 3].

Nositel teple energie je elektromagnetické záření šířící se rychlostí světla. Intenzita tepelného záření závisí tedy na povrchové teplotě a na fyzikálních vlastnostech povrchu těles. Aby docházelo k přenosu tepla zářením je nutné, aby prostředí mezi dvěma tělesy bylo alespoň částečně průteplivé (diatermní) [2].

Tepelné záření se vyskytuje v oblasti ultrafialového záření, viditelného záření a infračerveného záření [2].

Dle Birda a kol. [1] lze kvalitativně elektromagnetické záření popsat takto: Dodá-li se tuhé látce energie, dostanou se některé její molekuly či atomy do “excitovaného stavu”. Avšak atomy i molekuly mají tendenci vrátit se do stavu s nižší energií, tím pádem dochází k vysílání přebytečné energie ve formě elektromagnetického záření. Díky tomu, že záření může pocházet ze změn elektronového, vibračního a rotačního stavu atomů či molekul, bude elektromagnetické záření rozloženo v určitém rozsahu vlnových délek [1]. Podrobněji se problematice záření věnují studie [12, 13].

Při šíření tepelného záření dochází k absorpci tepelného toku, reflexi (odrazu) tepelného toku a transmisi (průchodu) tepelného toku. Součet poměrné pohltivosti, reflexe a transmise musí být roven jedné.

Pomineme-li konvekci tepla vlivem rozdílu teplot tělesa či plynu v okolí, které absorbuje teplo, lze určit mezní případy, kdy pro dokonale černý povrch dosahuje hodnoty 1 absorpce a pro dokonale bílý povrch dosahuje hodnoty 1 naopak odrazivost dopadajícího záření. Pokud by se jednalo o dokonale průzračné těleso, byla by hodnota transmise rovna jedné [3].

**Lambertův zákon** říká, že největší sálavost je ve směru normály dané plochy [3].

**Planckův zákon** podle rovnice (48) vyjadřuje závislost spektrální hustoty zářivého toku černého tělesa  $E_{\lambda,0}$  na povrchové termodynamické teplotě  $T$  a vlnové délce  $\lambda_r$ .

$$E_{\lambda,0} = \frac{C_1}{\lambda_r^5 \cdot \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda_r \cdot T}\right) - 1 \right]} \quad (48)$$

Výpočet konstant je uveden v rovnicích (49) a (50), kde  $h = 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$  značí Planckovu konstantu a  $k_B = 1,3805 \cdot 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$  označuje Boltzmannovu konstantu. Veličina  $c_0 [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$  zde popisuje rychlost světla ve vakuu [2, 3]

$$C_1 = 2 \cdot \pi \cdot h \cdot c_0^2 \quad (49)$$

$$C_2 = \frac{h \cdot c_0}{k_B} \quad (50)$$

Dle **Wienova posunovacího zákona** se maxima spektrální hustoty zářivého toku černého tělesa s klesající teplotou posouvají k větším vlnovým délkám, jak znázorňuje rovnice (51) [1].

$$\lambda_{max} \cdot T = 2885 \quad (51)$$

Energie vyzařovaná černým tělesem neboli intenzita vyzařování je v podstatě horní mez vyzařované energie skutečnými tělesy a tato energie je funkcí teploty. Stefan-Boltzmanův zákon (52) získáme integrací Planckova zákona podle rovnice (48) [12].

Tento zákon vyjadřuje hustotu celkové energie vyzářené povrchem černého tělesa, která je úměrná čtvrté mocnině absolutní teploty sálajícího tělesa [1, 2, 12]

$$E_0 = \int_0^\infty E_{\lambda,0} d\lambda = \sigma \cdot T^4 \quad (52)$$

Veličina  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$  je Stephan-Boltzmannova konstanta a  $T$  je absolutní teplota tělesa [1].

Pokud by se nejednalo o dokonale černé těleso, je třeba rovnici vynásobit součinitelem relativní zářivosti = emisivity  $\varepsilon$ , který vyjadřuje poměr intenzity vyzařování tepla skutečným povrchem a povrchem dokonale černým [3, 12]

### 2.3.1 Přenos tepla radiací mezi plochami

Budeme-li uvažovat dvě obecně položené rovinné plochy o různých teplotách, lze výsledný tepelný tok při sálání spočítat dle vztahu (53) a (54).

$$\dot{Q} = C_{12} \cdot \varphi_{12} \cdot S_1 \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (53)$$

$$C_{12} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot C_0 = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_0} \quad (54)$$

Kde  $T_1$  a  $T_2$  jsou termodynamické teploty povrchů, přičemž platí, že  $T_1 > T_2$ ,  $\varepsilon_1$  a  $\varepsilon_2$  vyjadřují emisivity povrchů,  $C_{12}$  označuje součinitel vzájemného sálání a  $\varphi_{12}$  je geometrická charakteristika vzájemného sálání povrchů a udává jaká část vysálaného tepelného toku vyzařovaného sálající plochou  $S_1$  dopadá na plochu  $S_2$  [2].

Zavedením veličiny teplotní součinitel  $\xi$  dle rovnice (55), získáme tvar rovnice (56), ze kterého lze jednoduše odvodit nahrazením součinu  $C_{12} \cdot \xi \cdot \varphi_{12}$  a zavedením součinitele přenosu tepla radiací  $\alpha_r$  vztah (57) analogický s rovnicí pro přenos tepla konvekcí [2].

$$\xi = \frac{\left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4}{T_1 - T_2} \quad (55)$$

$$\dot{Q} = C_{12} \cdot \xi \cdot \varphi_{12} \cdot S_1 \cdot (T_1 - T_2) \quad (56)$$

$$\dot{Q} = \alpha_r \cdot S_1 \cdot (T_1 - T_2) \quad (57)$$

Celkový tepelný tok (odvedený z povrchu tělesa při současném odvodu tepla konvekcí a radiací) vyjadřuje rovnice (58), kde  $T_1$  vyjadřuje povrchovou teplotu tělesa,  $T_2$  teplotu povrchu, na které těleso vyzařuje teplo a  $T_a$  teplotu okolního vzduchu. Aby docházelo ke sdílení tepla konvekcí a radiací zároveň, je nutné zajistit podmínku průteplivého prostředí v okolí tělesa [2].

$$\dot{Q} = \alpha_r \cdot S_1 \cdot (T_1 - T_2) + \alpha \cdot S_1 \cdot (T_1 - T_a) \quad (58)$$

### 3 Význam přenosových jevů v soustavě člověk – oděv – prostředí

Přenosové jevy zauímají důležité místo v soustavě člověk, oděv a prostředí, jakožto hlavní představitelé termofyziologického komfortu [14]. Je tedy nutné na celou problematiku hodnocení komfortních vlastností oděvu či textilií pohlížet komplexně a neopomíjet jejich důležitost.

Z hlediska přenosových jevů tvoří všechny textilní vrstvy (oděvy) bariéru proti volné výměně tepla a tekutin mezi lidským tělem a prostředím [10] a hrají základní roli v celé problematice oblasti komfortu.

Okolní prostředí člověka, ve kterém se většinu času nachází, by tedy mělo být esteticky příjemné, světlé, s přístupem čerstvého vzduchu a poskytující dostatečný tepelný komfort. Jsou-li tyto podmínky splněny, lze očekávat vyšší produktivitu práce, vyšší pozornost a soustředění a snížená zdravotní rizika. Příliš teplé prostředí způsobuje mentální otupění a naopak příliš chladné může zapříčinit více nehod. Tepelný komfort lze do jisté míry ovlivnit právě vhodným oděvem [15].

#### 3.1 Historie oděvního komfortu

Nedílnou součástí každého lidského života je právě oblast odívání. Od začátku lidského vývoje bylo hlavním úkolem textilu a oděvu především chránit lidské tělo před počasím s dostatečným fyziologickým a psychologickým komfortem pro uživatele při jakékoliv činnosti. Vývoj textilií a oděvů je úzce spojen s vývojem lidské společnosti a změnami životního prostředí. Historicky lze zaznamenat tři základní etapy tohoto spojení [16].

**První fáze** se týká období, kdy textilní materiál či oděv působil jako překážka mezi lidským tělem a prostředím. Jako nejstarší funkce oděvu je tedy považována ochrana před chladem a slunečním zářením, která spadá již do pravěku [16].

**Druhá fáze** spadá do první poloviny dvacátého století, kdy se výzkum v oblasti textilu zaměřil na ochrannou funkci textilu či oděvu proti teplu (otevřený oheň, vysoké teploty) [16].

**Třetí fáze** je obdobím po 50. letech, kdy došlo ke zvýšení požadavků obyvatel na pohodlí člověka i ve vnitřním prostředí a souvisí i s vyšší životní úrovní rozvinutých společností. Díky zvýšení času stráveného v uzavřeném prostředí (včetně dopravních prostředků) až o 90% [17], bylo potřeba důkladně prozkoumat všechny součásti vnitřního prostředí a jejich vliv na lidský komfort, zdraví a produktivitu [14].

Oblast komfortu ve spojení s oděvem nejdříve zkoumali především psychologové a označovali jej jako psychologický komfort. Avšak již o mnoho let dříve vznikaly studie předních fyziků zabývající se přenosovými jevy, teorií o přenosu hmoty, koeficienty přenosu hmoty konvekcí a vypařováním, který je konstantní a známý jako Lewisův vztah (= poměr koeficientů přenosu tepla vypařováním a přestupu tepla prouděním) [18].

V 19. století vzniklo několik významných prací zabývajících se především hodnocením termofyziologického komfortu, především vlivu vlhkosti na tepelnou pohodu organismu. Jednou z prvních prací je i studie japonských autorů Nishi and Gagge [19], která podrobně popisuje komfort uživatele podle výparného odporu oděvu. Ve své studii podrobně popisuje i tepelnou bilanci lidského těla.

V roce 1984 vznikla práce autorů Adlera a Walshe "Mechanismus transportu vlhkosti mezi materiály", která se již zabývá vývojem techniky pro studium transportu vlhkosti skrz textilie pro různé úrovně zavlhčení. Je zde také popsán knotový efekt v souvislosti s množstvím absorbované vlhkosti do textilie [20]. O 4 roky později pak byla publikována 1. část práce [21] od kolektivu autorů zabývajících se dynamickým přenosem vodních par skrz textilie, která je zaměřena především na obsah vlhkosti v oděvu a na vliv typu použitých vláken.

Kromě výše uvedeného se pozornost výzkumných center zaměřila na vývoj tepelných a později i potících manekýnů. Podrobněji se vývojem manekýnů zabývá například kniha [22].

### **3.2 Oděvní komfort a jeho jednotlivé složky**

Význam spojení "oděvní komfort" popsal například už v roce 1970 Fourt ve své práci [23]. Dle jeho slov zahrnuje oděvní komfort tepelné i netepelné složky a souvisí s nošením při práci či činnosti v kritických i nekritických podmínkách.

V roce 1985 vysvětlil tento pojem například i Slater [24] jako "příjemný stav fyziologické, psychologické a fyzické harmonie mezi člověkem a prostředím". Slater vyzdvihl význam prostředí pro pocit komfortu a definoval tři typy komfortu. Fyziologický komfort souvisí se schopností lidského těla udržovat si zdraví, psychologický komfort souvisí s duševní pohodou pro zdravou mysl a fyzický komfort se týká působení vnějšího prostředí na lidské tělo [24].

Například u Hese je toto rozdělení doplněno ještě o 4. kategorii a to o komfort patofyziologický [10]. Také ve svých publikacích neužívá pojem fyzický komfort, ale nazývá jej jako senzorický. Oděvní komfort je tedy značně relativní a subjektivní pojem ovlivěný vnímáním daného jedince a jeho subjektivními pocity nepohodlí či bolesti [14].

Komfort však musí být chápán nejen jako funkce fyzikálních a materiálových vlastností textilu či oděvu a životního prostředí, ale i v úplném kontextu fyziologické a psychologické reakce člověka. Zároveň je důležité nezapomínat na fakt, že je individuální hodnocení komfortu značně subjektivní. Lidská mysl je schopná si objektivní parametry "upravit" a filtrovat [25].

Subjektivní vnímání zahrnuje psychologické procesy, ve kterých jsou všechna významná smyslová vnímání vyhodnocována a porovnávána s minulými zkušenostmi a současnými požadavky na celkové posouzení stavu komfortu. Vzájemné působení těla a oděvu (jak tepelné, tak i mechanické) hraje důležitou roli při určování pohodlí uživatele. Velký vliv na pohodlí uživatele má také externí prostředí (fyzické, sociální a kulturní) [25].

Jednou ze studií, která se zabývá právě subjektivním hodnocení komfortu, je studie s názvem "Subjektivní testování textilií" [26]. Tato studie z roku 1997 porovnává výsledky objektivních způsobů testování s výsledky získanými subjektivní metodou.

Vzhledem k tomu, že kontakt mezi oblečením a lidským tělem trvá nepřetržitě, dochází neustále ke stimulaci mechanických, tepelných a vizuálních vjemů uživatele. Tento pocit je komplikován smyslovým komfortem, což je relativně nová oblast výzkumu komfortu oděvu [25].

Při diskomfortu většinou nastupují pocity tepla nebo chladu. Při větším pracovním zatížení, nebo v teplém klimatu se většinou dostaví pocity tepla, horka. Naopak při malém pracovním zatížení či při nízké teplotě okolního prostředí dochází u uživatele k pocitům chladu [10].

Pro lepší pochopení, jakým způsobem funguje subjektivní vnímání komfortu, je vhodné považovat lidské oděvy spolu s nositelem a okolím za otevřený systém, který je vždy ve stavu dynamické interakce s okolním prostředím ve fyzických, senzorických, psychologických a informačních procesech. V tomto systému existuje řada interaktivních procesů, které určují stav pohodlí uživatele [25]:

- Fyzikální procesy, kam patří transport tepla a vlhkosti v oděvu, mechanické interakce mezi oděvem a tělem, odraz a absorpce světla oblečením, které poskytují fyzický stimul (nebo signál) tělu [25].
- Fyziologické (či termofyziologické) procesy, jako je tepelná rovnováha těla a jeho termoregulační odezvy a dynamické interakce s oděvem a prostředím, které určují fyziologický stav těla a jeho přežití za kritických podmínek [25].
- Neurofyziologické procesy, tj. jednotlivé senzory těla v kůži, očích a jiných orgánech, pomocí kterých jsou smyslové signály formulovány z interakcí těla s oděvem a okolním prostředím touhám [10, 25].
- Psychologické procesy, tj. procesy mozku, které vytvářejí subjektivní vnímání senzorických vjemů z neurofyziologických senzorických signálů. Následně formulují subjektivní celkové vnímání a preference tím, že vyhodnocují a porovnávají různé smyslové vnímání oproti minulým zkušenostem a vnitřním touhám [10, 25].

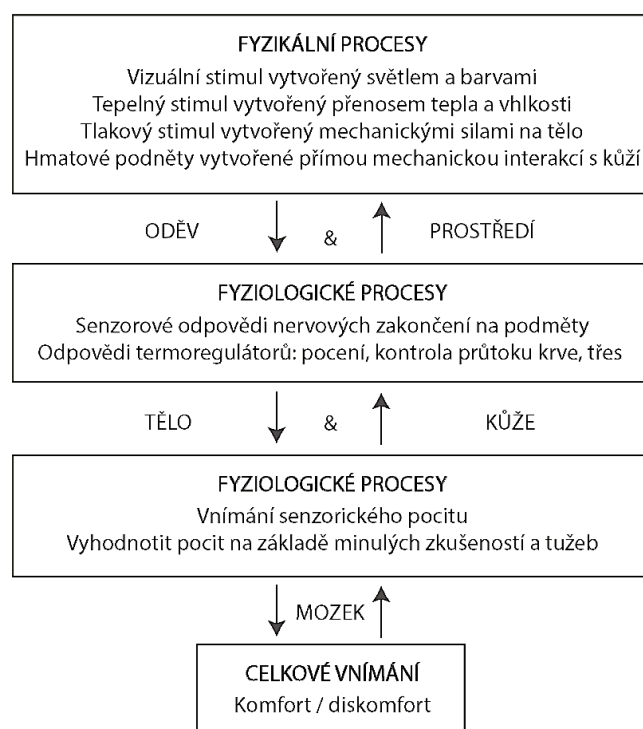


Tyto čtyři typy procesů se vyskytují souběžně. Fyzikální procesy mezi prostředím a oděvem se řídí zákony fyziky, které určují fyzické podmínky pro přežití a pro pocit pohodlí nositele. Oproti tomu psychická síla mozku může ovlivňovat fyziologický stav těla různými způsoby, jako je pocení, průtok krve a třes [25].

Komfort je tedy vícerozměrný a složitý jev. Subjektivní vnímání pohodlí zahrnuje složité procesy, ve kterých velké množství podnětů z oděvu a vnějšího prostředí proudí do mozku prostřednictvím sensorických odezev a vytváří subjektivní vnímání. Toto vnímání zahrnuje psychologický proces, ve kterém jsou všechna relevantní smyslová vnímání formulována, zvážena, kombinována a vyhodnocena na základě minulých zkušeností, aby vytvořily celkové hodnocení stavu komfortu. Dle Pontrelliho [27] ovlivňují stav pohodlí nositele především tyto proměnné:

- fyzické proměnné prostředí a oblečení,
- psychofyziologické parametry nositele,
- psychologické filtry jeho mozku.

Proces formulace subjektivního vnímání celkového pohodlí zobrazuje následující obrázek 4.



Obr. 4 Proces formulace subjektivního vnímání celkového pohodlí [15]

Fyzické procesy poskytují signály nebo podněty smyslovým orgánům lidského těla, které je přijímají, produkují neurofyziologické impulsy, které posílají do mozku a přijímají opatření k úpravě rychlosti pocení, průtoku krve a někdy i produkce tepla.

Mozek zpracuje smyslové signály, aby formuloval subjektivní vnímání různých individuálních pocitů, a dále je vyhodnocuje a zvažuje proti minulým zkušenostem a touhám, které jsou ovlivněny mnoha faktory, jako je fyzické, environmentální, sociální a kulturní prostředí a stav bytí [15].

Jak již bylo zmíněno, existují čtyři základní typy komfortu: senzorický, termofyziologický, psychologický a patofyziologický [10]. Následující kapitoly popisují podrobněji každý z nich.

### **3.3 Senzorický komfort**

Faktory, které určují senzorický komfort, jsou spojeny se smysly: dotykem, zrakem, sluchem a vůní [10, 14, 25]. Klíčovou roli v používání textilu a oděvu lidmi hraje dotyk a zrak, ve zvláštních případech i vůně [14]. Protože je senzorický komfort určen receptory lidského těla, je považován za značně subjektivní a je ovlivněn různou citlivostí vnímání jednotlivých jedinců [14].

Pocity vznikají při přímém kontaktu oděvu s pokožkou a můžeme mezi ně zahrnout pocity příjemné, jako je například pocit měkkosti, splývavosti, hřejivosti, nebo pocity negativní, což je například škrábání, kousání, píchání či lepení se oděvu na pokožku [10, 28]

Podle Hese [10] můžeme na senzorický komfort nahlížet ze dvou hledisek. První hledisko vysvětluje senzorický komfort jako komfort nošení a je ovlivněno především povrchovou strukturou použitých textilií, vybranými mechanickými vlastnostmi (ty mají vliv především na rozložení sil a tlaků v oděvním systému) a také sorpčními vlastnostmi textilií s dopadem na své kontaktní vlastnosti. Poslední vyjmenované vlastnosti úzce souvisí s fyziologickým komfortem.

Druhé hledisko zahrnuje omak, což je veličina založená především na vjemu prostřednictvím prstů a dlaně a je velmi špatně reprodukovatelná a také značně subjektivní. Pro zjednodušení lze omak charakterizovat následnými vlastnostmi: hladkostí (součinitelem povrchového tření), objemností (nebo stlačitelností), ohybovou a smykovou tuhostí a také tepelně kontaktním vjemem [10].

### **3.4 Termofyziologický komfort**

Termofyziologický komfort zahrnuje především fyzikální procesy v oděvním komfortu a prolíná se v něm i teorie z přenosových jevů. Termofyziologický komfort je tedy přímo ovlivněn sdílením tepla a hmoty mezi lidským organismem a okolím. V posledních letech existuje mnoho studií na toto téma. Fungování lidského těla souvisí především s teplotou organismu a také teplotou okolního prostředí. Lidské tělo si během procesu vývoje vyvinulo velmi citlivý a jemný mechanismus termoregulačního systému - udržování teploty hlavních orgánů a systémů, avšak jen ve velmi úzkém teplotním rozmezí.

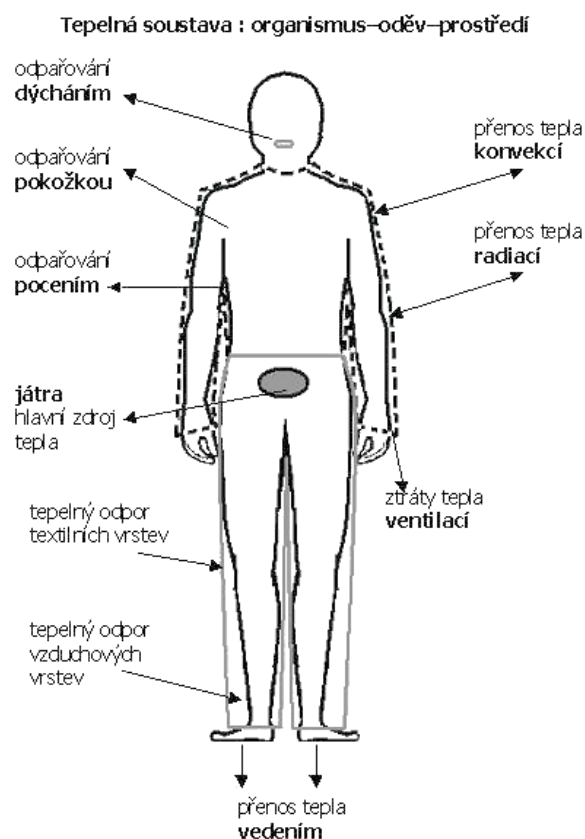
Proto není lidské tělo schopno většinou přežít bez oděvu a úkrytu. Platí to i pro moderní svět, kde lidé pracují v extrémních podmínkách jak v exteriéru, tak i v interiéru. Tyto činnosti nemohou být vykonávány bez vhodného oblečení, které poskytuje tepelnou ochranu každému jednotlivci. Subjektivní vnímání pocitu tepla u dospělých jedinců klesá s věkem, což souvisí se snižující se odezvou termoregulačního systému. Starší lidé proto požadují větší ochranu před podchlazením, podobně jsou na tom i novorozenci [14].

Pro udržení tepelné rovnováhy těla je důležitá tzv. termoregulace. Ta způsobuje sekreci potu, díky které se přebytek tepla z těla dostává ven. Pojem termoregulace tedy označuje schopnost udržovat vnitřní teplotu lidského těla v daném teplotním intervalu. Metabolické procesy udržují v těle za pomoci buněčných enzymů teplotu okolo 37 °C, která zajistí harmonický průběh životních funkcí člověka. Platí tedy, že vnitřní teplota zůstává konstantní, pokud je množství tepla vyprodukované tělem rovno tepleu odevzdanému do okolního prostředí [10].

Tělesná teplota obecně kolísá v závislosti na fyziologickém stavu těla a okolních podmínkách a je rozdílná pro různé části lidského těla. Nejvyšší teplotu 34–36 °C naměříme na nejlépe prokrvených částech těla (hlava, břicho, prsa). Například podle Hese [10] je ideální průměrná teplota pokožky mezi 32–34 °C. Okrajové části těla (ruce, nohy) dosahují teploty asi 29–31 °C a nejchladnější části těla (špička nosu, ušní lalůčky a špičky prstů) pouze teploty 23–28 °C. Teplota jádra (vnitřní teplota organismu) je vyšší a činí cca 37 °C. Na této úrovni je u zdravého člověka udržována za všech okolností, proto v případě chladu dochází k omezení prokrvení periferních oblastí (zúžení cév, tzv. vazokonstrikce) a tím pádem i k poklesu jejich teploty. Naopak při vysokých okolních teplotách dochází k rozšíření cév, tzv. vazodilatace. Nižší tělesná teplota se objevuje během spánku. Při normálním prokrvení organismu nedochází k pocení, nenastává pocit chladu a je tedy dosaženo tzv. termofyziologického komfortu neboli stavu tepelné pohody.

Díky oblečení mohou lidé omezit výměnu tepla mezi tělem a okolním prostředím a vydržet tak i extrémní klimatické podmínky. Při činnostech, kdy se metabolická tvorba tepla výrazně liší, je nutné zabránit nadměrnému ukládání tepla nebo naopak nedostatku tepla v těle. Za tímto účelem má lidské tělo různé termoregulační mechanismy. Úkolem oděvu je co nejvíce termoregulaci těla podpořit [29].

S tím úzce souvisí i pojem tepelná bilance organismu. Lidské tělo si dokáže vytvořit své vlastní teplo, přijímat teplo od okolí a také jej do okolí odevzdávat. Následující obrázek zobrazuje zjednodušeně všechny uplatněné mechanismy přenosu tepla.



Obr. 5 Tepelná bilance lidského těla [10]

Tepelnou bilanci lidského těla vyjadřuje následující obecně známá rovnice (59) [10].

$$M - L_M = \dot{Q}_{cond} \pm \dot{Q}_{conv} \pm \dot{Q}_{rad} - \dot{Q}_{ins} - \dot{Q}_{res} - \dot{Q}_{persp,e} - \dot{Q}_{persp} \quad (59)$$

Kde  $M$  je celkový metabolický výkon,  $L_M$  je pracovní výkon. Jednotlivé tepelné toky označují přenos tepla vedením, přenos tepla konvekcí, je přenos tepla radiací, ochlazování nepatrným neustálým avšak nevnímaným odpařováním z kožních pórů (až  $0,15 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$  tělesné hmoty), ochlazování dýcháním, při kterém dochází k přenosu tepla konvekcí na vnitřním povrchu plic, (až  $0,3 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$  tělesné hmoty), ochlazování odparem na vnitřním povrchu plic a intenzivní ochlazování pomocí potních žláz.

Rovnice (59) platí v případě, že je organismus v tepelně neutrálním stavu. Pokud tomu tak není, bude obsahovat ještě člen, který představuje akumulaci, nebo tepelnou ztrátu [29].

Například Rossi ve své studii [29] uvádí, že při běžných klimatických podmínkách ( $t_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $RH = 50 \%$ ) je dominantní přenos tepla radiací, který tvoří cca 45 % celkového přenosu tepla. Tepelné ztráty dýcháním tvoří pouze 10 % celkových tepelných ztrát, ale při nízkých venkovních teplotách se však mohou zvýšit na více než 30 %.

Produkce metabolického tepla se může značně lišit v závislosti na aktivitě, například Rossi ve své práci [29] popisuje rozmezí od 80 Wattů v klidu do více než 1000 Wattů při vysoké tělesné zátěži a je tedy značně proměnlivá s ohledem na stupeň tělesné zátěže.

Pro hodnocení termofyziologického komfortu nelze opomíjet kromě teploty i relativní vlhkost v blízkosti pokožky, což zmiňují již v roce 1970 ve své studii [30] Greenwood a kolektiv. Oba dva parametry (teplota pokožky i relativní vlhkost v její těsné blízkosti) mají tendenci růst společně se zvyšující se teplotou okolního vzduchu a relativní vlhkostí okolního vzduchu. Za komfortní teplotu pokožky je zde považována hodnota mezi 33 °C a 35 °C pro průměrného muže, což je o 1 °C více, než ve své práci [10] uvádí Hes.

Autoři studie [19] Nishi a Gagge se zmiňují o tom, že lze zaměnit výpočet ztráty tepla vypařováním v rovnici tepelné rovnováhy za obsah vlhkosti pomocí koeficientu konvektivního přenosu a gradientu parciálních tlaků páry směrem od kůže do okolního vzduchu.

Také autoři studie [31] Umbach a Mecheels používali míru vlhkosti kůže jako faktor nepohodlí pro popis subjektivního pocitu komfortu. Z jednoduchých subjektivních měření dospěli k závěru, že průměrná vlhkost pokožky by měla být nižší než 30 %, aby se muž cítil komfortně.

Termofyziologický komfort jednotlivce je tedy spojen s udržováním tepelné rovnováhy mezi produkcí tepla tělem a tepelnými ztrátami a s tím související i relativní vlhkosti v těsné blízkosti pokožky [14].

Fyziologická reakce lidského těla na danou kombinaci oblečení a okolních podmínek je předvídatelná ve chvíli, kdy systém dosáhne ustáleného stavu. Může být vypočítána na základě znalostí snadno měřených faktorů, jako je tepelná odolnost a odolnost oblečení proti vlhkosti, znalosti klimatických podmínek a úrovně fyzické aktivity [25].

Termofyziologická funkce oděvu je tedy hlavním prvkem při posuzování kvality ochranného oděvu. Fyziologicky optimalizované oděvy napomáhají udržení zdraví a kondice nositele a zabraňují jeho únavě nebo přehřátí [32].

### **3.5 Psychologický komfort**

Psychologický komfort je spojen s designem oděvů, módou, kulturními a sociálními faktory, minulými zkušenostmi, přesvědčením a psychikou nositele. Psychologické faktory dokonce v některých případech převažují nad skutečnými fyziologickými či jinými faktory a stávají se tedy primárními. Vzhledem ke své subjektivní povaze se psychologický pocit komfortu výrazně liší mezi jednotlivými uživateli a je velmi obtížné jej objektivně zhodnotit. Při stejných podmínkách prostředí a za použití stejného typu oblečení se může jedna osoba cítit výborně, zatímco jiná se necítí komfortně [33].

To se týká i situace, kdy mohou mít dvě osoby stejnou teplotu jádra i pokožky, stejné oblečení a stejné podmínky prostředí a přesto mají rozdílný pocit při vnímání celkového pohodlí (komfortu). Odlišné vnímání pocitu komfortu je způsobeno nejen fyziologickými rozdíly mezi lidmi, ale právě i psychologickými faktory [33].

Psychologický komfort tedy odráží individuální požadavky lidí na celkový vzhled oděvu, módní trendy a další faktory, které se většinou týkají umění [10]. Pomocí oděvu mohou lidé také vyjádřit potřebu individuality nebo zajistit anonymitu a soukromí. Neméně důležitá je například i role textilu v interiéru, který odráží jednotlivé požadavky obyvatel a celkové architektury [14].

### 3.6 Prostředí

Lidský termoregulační systém je přizpůsoben především tropickým klimatickým podmínkám, kde se obvyklé teploty vzduchu pohybují mezi 15–28 °C [34]. Rozsah fyziologického komfortu je však mnohem užší, tj. komfortní rozsah, kdy lze dosáhnout pocitu tepelného komfortu bez třesu nebo pocení, až do okamžiku, kdy vlhkost pokožky přesáhne 20 %, aby se dosáhlo potřebného odpařovacího chlazení. Goldman uvádí, že lidská komfortní zóna pro fyziologickou regulaci těla s košilí a kalhotami je v rozmezí 22,2–25,5 °C [34].

Proto kromě oděvu hraje významnou roli pro termofyziologický komfort uživatele i okolní prostředí, ve kterém se uživatel pohybuje. Toto prostředí zahrnuje jednak zeměpisné podnebí pro pobyt venku a dále pak i vnitřní podmínky pracovního prostředí, které lze charakterizovat pomocí teploty mokrého teploměru [10].

Oděv je tedy nutné navrhovat tak, aby jeho nositel byl schopen v každém z těchto prostředí podat maximální tělesný a duševní výkon [10].

Jednotlivé klimatické oblasti podrobněji popisuje norma ČSN EN 60721 [35], která zmiňuje celkem 9 klimatických oblastí.

V odborné literatuře se však setkáme i s jiným rozdělením. Například Hes ve své publikaci [10] toto rozdělení zjednodušuje na čtyři základní oblasti, a to: studená oblast, střední oblast, horká suchá oblast a horká vlhká oblast.

Ve studené oblasti ovlivňuje tepelný komfort uživatele nejen nízká teplota, ale také silný vítr, který umocňuje vliv záporných teplot na lidský organismus. Při nízkých teplotách a vysoké síle větru může lidská pokožka omrznout během velmi krátké doby [10]. Studené prostředí je charakterizováno kombinací vlhkosti a větru při teplotě nižší než –5°C [36]. V zasněžených oblastech ohrožuje lidské tělo také vysoká intenzita UV záření, díky odrazu slunečních paprsků od ledových krystalků sněhu [10].

Oděv do této oblasti by měl splňovat zásady správného vrstvení tak, aby ochránil nositele před chladem a větrem z okolí a zároveň umožnil dostatečný odvod vodních par vznikajících během pocení člověka. Ideální se jeví systém pěti vrstev, protože mezi každou vrstvou zůstává uzavřená vrstva nehybného vzduchu, která zvyšuje celkový tepelný odpor oděvu. Zároveň lze počet vrstev jednoduše měnit v závislosti na okolních podmínkách [10].

Studie [36] popisuje vlastnosti oděvu do chladného počasí, technologie a trendy v jeho vývoji. Také diskutuje o faktorech při vytváření mikroklimatu ve vrstvených oděvních systémech, aby se uživatel lépe vyrovnal s chladem. Podrobněji se pak zaměřuje na oblečení pro motocyklisty a horolezce. Ve studii [37] je podrobně popsána metoda testování tepelné izolace a výparného odporu pomocí tepelných manekýnů.

Vývoj oděvů do chladného počasí pro vojáky s důrazem na návrh výzkumu inteligentních materiálů a technik pro vojenské systémy popisuje ve své studii Scott [38]. Vzhledem ke specifickým podmínkám (nemožnost častého praní, nemožnost se častěji převlékat, ...) ve kterých se vojáci pohybují, zmiňuje autor 4 důležité zásady: udržuj oděv čistý, nepřehřívej se, vrstvi oděv a udržuj se v suchu. Tím však požadavky na vojenský oděv nekončí, vzhledem k nebezpečí, které jim hrozí, musí oděv splňovat i další podmínky (balistická ochrana, ochrana proti plamenům, teple, bleskům, chemickým zbraním a jiné) [38].

Pro lidské zdraví je chlad velmi nebezpečný, protože může negativně ovlivnit naše fyziologické funkce, pracovní výkony a dokonce i náš život [39].

Do střední oblasti spadá i Česká republika a teploty se v ní pohybují mezi  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , absolutní vlhkost nabývá cca  $17\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ . I zde lze využít principu vrstveného oblečení, neboť i v této oblasti se uživatel setkává s chladem. V letním období je naopak vhodné vycházet i z oděvů určených do horkých oblastí [10].

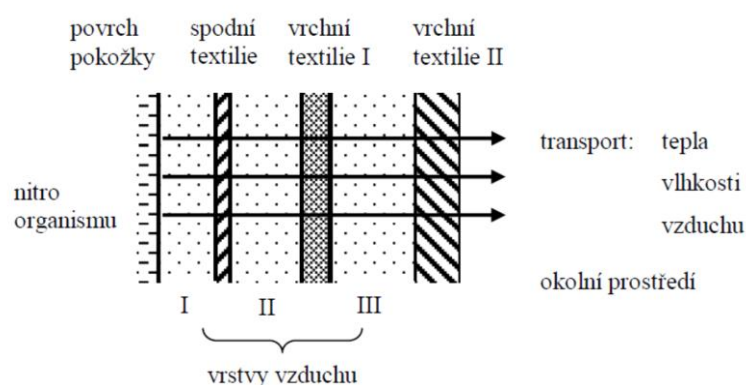
Třetí oblastí je horká suchá oblast, která je charakteristická vysokou denní teplotou (až  $43\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a nízkou vlhkostí vzduchu. Jedná se především o pouště a polopouště a je třeba si uvědomit, že i zde může teplota vzduchu v noci výrazně poklesnout. Jako denní spodní vrstvu je zde tedy vhodné zvolit oblečení z přírodních materiálů, kde pomalé odpařování potu způsobí příjemné ochlazení uživatele. Je třeba myslet i na ochranu proti UV záření a využívat pokrývky hlavy. Oproti tomu v noci je nutné přidat tepelně izolační vrstvu, která ochránní nositele před chladem [10].

Poslední oblastí je horká vlhká oblast, ve které je dosažení termofyziologického komfortu díky vysoké vlhkosti vzduchu (až  $30\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) asi nejnáročnější. Teploty se zde pohybují mezi  $12\text{--}35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Vzhledem k nízkému rozdílu parciálních tlaků vodní páry na povrchu potíciho se těla a v okolním prostředí je transport potu od pokožky téměř nemožný, oděv zůstává téměř pořád vlhký. Pocity uživatele jsou proto značně diskomfortní [10].

Oděv zde má za úkol umožnit nositeli přežít v dané oblasti bez kožních onemocnění či přehřátí organismu. Riziko plísní, přehřátí organismu či bodnutí hmyzem je zde velmi vysoké a pocitu komfortu zde nelze téměř dosáhnout [10].

### 3.7 Oděv

Oděv člověka tvoří především ochranný systém, ve kterém dochází k prostupu tepla a vlhkosti, závisející na konstrukci střihu, použitém materiálu, atd. Na oděv můžeme pohlížet jako na systém, který je tvořen jednotlivými vrstvami, jak zobrazuje obrázek 6. Každá taková vrstva přispívá k celkovému tepelnému komfortu uživatele. Vlastnosti jedné vrstvy ovlivňují vlastnosti vrstvy další a naopak a nelze je tedy uvažovat odděleně [10].



Obr. 6 Oděvní vrstvy [10]

V souladu s těmito poznatky proto musí rozsah výzkumu komfortu oblečení zahrnovat všechny čtyři základní oblasti: fyziku, fyziologii, neurofyziologii a psychologii pohodlí. Během několika posledních desetiletí se ve všech čtyřech oblastech dosáhlo významného pokroku vědců po celém světě a jsou podrobněji popsány například v publikaci [25].

Během celého vývoje oděvu se projevovала celá řada jeho významných funkcí, mezi které patří: ozdoba, společenský status a ochrana. Pokud je člověk oblečen dle nejnovějších trendů, poskytuje mu oblečení duševní pohodu z bezchybného vzhledu. Kvalitní a luxusní oblečení dává nositeli pocit uspokojení a zároveň oblečení může schovat drobné vady těla nositele. I přes tyto důležité funkce zůstává nejdůležitější ochrana před nepřízní okolního prostředí, což je také jeho nejstarší funkce. Jedná se především o udržení správné teploty těla a zároveň ochranu před poškozením těla odřením, zářením, větrem, elektřinou, chemickými či mikrobiologickými toxickými látkami [25].

Jak již bylo výše napsáno množství odvedeného tepla závisí na rozdílu teplot mezi pokožkou a okolní teplotou. U stojícího člověka je ztráta tepla vedením pouze minimální. Přibližně 10 % tepla produkovaného tělem je ztraceno dýcháním [29], zbylé teplo se tedy ztrácí z pokožky pomocí záření, proudění a vedením. Tepelný komfort uživatele lze tedy významně ovlivnit přidáváním či ubíráním vrstev oděvu [10, 34].



White a Ronk ve své práci z roku 1984 [40] uvádějí, že samotné oblékání košile a kalhot vede k 40% snížení tepelných ztrát způsobených izolací. O 4 roky později vzniká studie [41], ve které se autoři zabývali fyziologickými reakcemi a psychologickými pocity respondentů, kteří měli na sobě trička z různých typů přízí během cvičení a odpočinku.

Testování probíhalo v teplém prostředí ( $t_a = 32\text{ °C}$ ,  $RH = 45\%$ ) a studeném prostředí ( $t_a = 14\text{ °C}$  a  $RH = 32\%$ ), během kterého byla zaznamenána teplota tělesného jádra, kůže, srdeční frekvence, výdej energie, absorpce potu a ztráta potu. Zároveň probíhal záznam popisu pocitů podle stupnice uvedené v práci [42].

Při porovnání vlastností jednotlivých triček lze sledovat významný rozdíl pouze v absorpci potu a teplotě kůže. Změny v pocitech uživatelů byly proměnlivé, ale obecně vyzdvihuje, že se pocity tepla a mokra u většiny hodnotitelů zvyšovaly s cvičením [41]. V dalších letech se na toto téma objevuje spousta dalších studií, metod testování, které souvisí s vývojem tvarovaných syntetických vláken, nových pletených struktur, atd.

Ve studii Laing [43] je řešena problematika reakcí organismů uživatelů při nošení outdoorových oděvů. V této studii je porovnávána funkčnost oděvů pro outdoorové aktivity. Testování probíhalo u 10 atletických mužů při kontrolovaných podmínkách o teplotě  $32 \pm 2\text{ °C}$  a relativní vlhkosti  $20 \pm 2\%$  v prvním případě a o teplotě  $8 \pm 2\text{ °C}$  a relativní vlhkosti vzduchu  $40 \pm 2\%$  v případě druhém. V průběhu zkoušek byla naměřena u všech uživatelů srdeční frekvence, tělesná teplota, množství vlhkosti pod oblečením během odpočinku a během běhu, a také čas nástupu pocení. Dle výsledků této studie se nejlépe osvědčil oděv z jednolící vlněné pleteniny, a to při teple i chladu. Sama autorka ve svých studiích často zmiňuje, že jednotlivé účinky oděvů na nositele jsou ve většině případů spojeny s vlastnostmi textilií, ze kterých jsou oděvy vyrobené. Tato studie ukazuje, že pouze některé rozdíly v materiálových vlastnostech mohou ovlivnit měřitelné termofyziologické a percepční odpovědi nositelů a zdůrazňuje, že je obtížné předpovídat funkčnost oděvů pouze z laboratorních testů na textiliích.

Vliv materiálových parametrů na tepelný komfort studoval ve své práci například Holmér [44], kde porovnával izolační vlastnosti vlněných a polyamidových vláken. V práci byly porovnány oděvy z vlny a nylonu z hlediska tepelně izolačních vlastností při různých experimentálních podmínkách. Za sucha nebyl pozorován žádný výrazný rozdíl, avšak za mokra se izolační hodnoty pro oděvy z vlněných a oděvy z polyamidových vláken výrazně lišily. Vlněné oděvy vykazovaly lepší izolační vlastnosti, než oděvy z polyamidových vláken. Tuto domněnku potvrzuje i například studie [45], kde je vyhodnocen vliv podmínek mírného deště na pocit komfortu uživatelů u oděvů z vlněných a akrylových vláken, na které je z lící strany nanесena hydrofóbní úprava. Nositelé mají na sobě běžné spodní prádlo a na něm svetr z vlněných či akrylových vláken s hydrofóbní úpravou. Fyziologická měření profilu teploty a vlhkosti v mikroklimatu oděvu a na povrchu kůže ukázala významné rozdíly pro vlněná a akrylová vlákna v procesech přenosu tepla a vlhkosti.

Z hlediska subjektivního hodnocení komfortu při daných klimatických podmínkách jsou oděvy z vlněných vláken vhodnější než oděvy z vláken akrylových. Zároveň je ve studii sledováno vnímání komfortu v časovém období na začátku mírného deště, během něj a po jeho skončení, kdy u svetrů z akrylových vláken nastává pocit diskomfortu dříve než u vláken vlněných.

### 3.7.1 Vrstvení oděvu

Pro dosažení optimálního termofyziologického komfortu je nutné oděv i správně vrstvit. Oděv by měl vyhovovat především vnějším klimatickým podmínkám a aktuálnímu zdravotnímu stavu uživatele.

**Základní oděvní systém se skládá z těchto vrstev:**

**1. Spodní prádlo** – jeho úkolem je především odvod vlhkosti od těla nositele, čímž udržuje pokožku v suchu, což však platí v případě chladného počasí. V tomto případě je vhodné volit buď syntetické materiály, tzv. funkční, které odvádí vlhkost rychleji od těla nositele, nebo z přírodních materiálů vlnu, která má sice vysokou nasákavost, avšak i za mokra poskytuje teplý omak a nositele hřeje [43, 44, 46].

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole studie [46] zkoumá textilie z vlněných a polyesterových vláken z hlediska odvodu vlhkosti z mikroklimatu mezi pokožkou a oděvem. Díky vysoké nasákavosti vlněných vláken jsou tyto textilie schopné výrazně snížit nepohodlí způsobené hromaděním vlhkosti na kůži například oproti obyčejným netvarovaným polyesterovým vláknům.

Vliv vlhkého spodního prádla z různých textilních materiálů na termoregulaci člověka a jeho tepelný komfort při pobytu v chladném prostředí vyhodnocuje v 90 letech například studie [47]. Podle výsledku její experimentu má tloušťka prádla vyšší vliv na tepelný komfort a tedy i na tělesnou termoregulaci než druh použitého vlákna. O rok později vychází studie stejných autorů rozšířená o další testy a materiály [48]. Cílem této studie bylo porovnat význam úrovně aktivity a produkce potu vzhledem k celkovému nahromaděnému množství a umístění potu v třívrstevném souboru jako funkci materiálové a textilní konstrukce.

V případě velmi teplého a suchého klimatu je naopak žádoucí, aby materiál byl hodně savý (například bavlna) a svou dlouhou dobou sušení tělo nositele příjemně ochlazoval [10]. Vlivem horkého klimatu na komfort uživatele při nošení oděvů z různých druhů vláken se zabývá například i studie [49], která potvrzuje, že absorpce vlhkosti oděvních materiálů může významně ovlivnit fyziologické reakce a výkon jednotlivých nositelů.

Experiment byl proveden na hráčích basebalu a byl v něm vyhodnocen vliv oblečení z bavlněných a polyesterových vláken, které skutečně ovlivnilo díky různé absorpci vlhkosti rychlost hodů u trénovaných hráčů baseballu při velmi teplém klimatu. V této studii se také kladně projevil chladicí efekt dobře sajícího dresu z bavlněných vláken.

**2. Druhá spodní vrstva** – tato vrstva má podpořit funkci vrstvy první, tj. odvést vlhkost dále od těla a zároveň splnit i estetickou funkci [10]. Opět je volena s ohledem na klimatické či sociální podmínky (v horku je naopak žádoucí využít chladicí efekt vlhké textilie).

**3. Zateplovací vrstva** – zajišťuje především tepelný komfort, jedná se tedy o vrstvu izolační. (patří sem svetry, mikiny, atd.). Opět je nutné, aby umožnila odchod plynné vlhkosti mimo oděv [10].

**4. Svrchní vrstva** – jejím úkolem je částečná ochrana nositele před nepřízní počasí – větrem a deštěm a zároveň umožnit odchod vodních par [10].

**5. Vrstva do extrémních podmínek** – je vhodná především do horských oblastí, kde je nutné chránit tělo před velkými dešti, před sněhem, větrem nebo mrazem. Proto ji tvoří především membránové svrchní oděvy [10].

Kromě výše zmíněného systému pěti vrstev je nutné myslet i na zakrytí okrajových částí těla, jako jsou ruce, chodidla a hlava [10].

## 4 Sorpční vlastnosti textilních materiálů

U všech textilních vláken, které jsou obklopené prostředím s rozptýlenými jinými částicemi či molekulami, dochází k celé řadě procesů (elektrostatické přitahování či odpuzování, afinita k vláknům díky rozdílným chemickým potenciálům, tvorba vazeb pomocí vodíkových můstků a van der Waalsových sil) [50].

Z makroskopického hlediska lze v případě obklopení vlákna molekulami vodní páry, vody, kapaliny, plyny či pevnými částicemi (souhrně nazývanými penetranty) pozorovat tyto procesy:

***Difúze penetrantů prostředím*** – označuje velmi rychlý proces zahrnující pohyb penetrantu většinou vodou či vzduchem k vláknu.

***Adsorpce na povrchu vláken*** – znamená usazování penetrantu na povrchu vlákna (může být fyzikální nebo chemická adsorpce, která je lokalizovaná na vazná místa).

***Difúze hmotou vlákna*** – zahrnuje například navlhání či barvení, někdy dochází i k vytvoření vazby s vláknem = absorpce (v tomto případě by se pak už vázaný penetrant neúčastnil dalšího transportu).

***Desorpce molekul penetrantu do okolí*** – označuje transport penetrantu přes vlákna, například odpařením potu [50].

Procesy probíhají většinou současně.

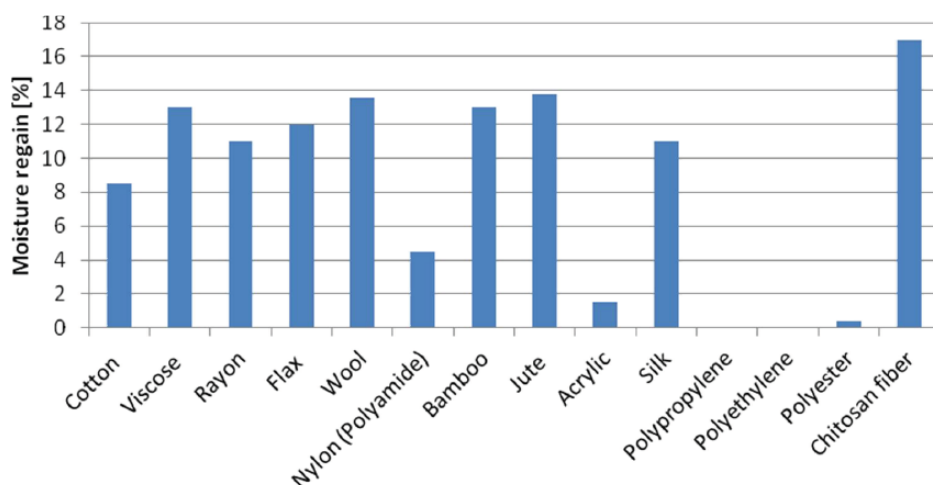
### 4.1 Nasákavost, navlhavost a vysýchavost

“Nasákavost neboli absorpce je schopnost materiálů ponořených do vody přijímat a fyzikální cestou vázat vodu při stanovené teplotě a čase” [51, s. 29].

“Vysýchavost je schopnost materiálů odevzdávat vodu do okolního prostředí” [51, s. 29]. Tyto vlastnosti závisí především na chemickém složení vláken, tvaru vláken, struktuře textilií, povrchové úpravě textilií či samotných vláken, atd. Bavlněné, lněné a hedvábné materiály pohlcují a odevzdávají vlhkost do okolního prostředí rychleji než například materiály vlněné. Poslední jmenované materiály však díky pomalé absorpci a uvolňování vlhkosti zajišťují nejstálější mikroklima pod oděvem. Oproti tomu viskózní vlákna vodu sice rychle pohltnou, avšak pomalu odevzdávají do okolí, čímž se výrazně snižují tepelně izolační vlastnosti oděvů z nich vyrobených [51].

Delljová [51, s. 28] vysvětluje pojem navlhavost jako “schopnost materiálů pohlcovat vlhkost ze vzduchu”. Tato vlastnost se vyjadřuje v procentech pomocí poměru hmotnosti vody pohlcené materiálem za daných klimatických podmínek (při určité teplotě, tlaku a rel. vlhkosti vzduchu) k hmotnosti suchého materiálu.

Hodnoty navlhavosti pro jednotlivá vlákna při standardních podmínkách (nebo-li vlhkostní přírážky) jsou uvedeny v grafu na obrázku 7.



Obr. 7 Navlhavost různých vláken při  $t_a = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $RH = 65\%$  [52]

Experimenty, které se týkají navlhavosti vláken, je možné nalézt také v mnoha dalších studiích, například [53, 54, 55]

Z hlediska termofyziologického komfortu patří odpařování potu z povrchu lidského těla a jeho transport skrz celý oděvní systém k nejdůležitějším mechanismům, jež ovlivňují právě přestup tepla a s tím i spojený pocit komfortu. Odpařování potu je tedy jedním ze základních mechanismů termoregulace (nejen lidského) organismu [10]. Při tomto ději dochází mezi pokožkou a oděvem ke zvýšení vlhkosti, oděvní vrstva se dostává do kontaktu s vlhkostí, kterou buď absorbuje do své struktury, nebo ji kapilárními cestami transportuje dále od těla nositele [56].

Tvorba potu a jeho hromadění pod oděvním systémem může mít za následek pocit diskomfortu pro uživatele při běžných klimatických podmínkách prostředí nejen kvůli odvodu tepla, ale také díky zvýšení koeficientu tření [14].

Naopak v horkých a suchých oblastech může být tento stav žádoucí, aby bylo dosaženo ochlazení nositele. Celý tento proces spojený s přestupem tepla závisí do značné míry právě na sorpčních vlastnostech materiálů [10, 14, 16, 51].

Z hlediska afinity k vodě lze vlákna rozdělit na:

**Hydrofilní vlákna** – jedná se o vlákna, která jsou schopna vázat a transportovat vodu (mají k ní afinitu). Řadí se sem všechna vlákna přírodní a chemická, která obsahují hydrofilní skupiny.

**Hydrofóbní vlákna** – tato vlákna nemají k vodě afinitu. Nedochází u nich k vázání vody specifickými vazbami a ke smáčení povrchu vláken. Patří mezi ně především syntetická vlákna. Voda se u svazků hydrofóbních vláken šíří vlivem kapilárních sil (mechanicky se váže na praskliny a mikropóry).

Sorpční procesy souvisí s chemickým složením vláken (existencí a přístupností sorpčních center, případně vznikem sekundárních sorpčních center), s povrchem vláken, rozvolněností struktury, tvarem a distribucí pórů, teplotou, časem a koncentrací penetrantu [50].

Při nošení oděvu bývá textilie s kapalinou pouze v místním styku (částečné ponoření do kapaliny, kapky na povrchu textilie, atd.). Díky tomu dochází ke smáčení a vzlínání kapilárními cestami mezivláknennými póry [50].

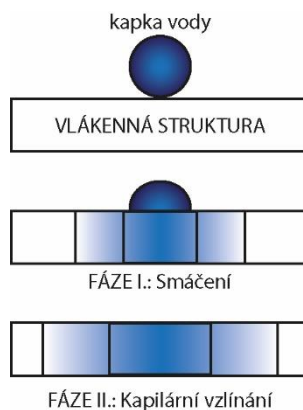
## 4.2 Smáčivost

Z hlediska komfortních vlastností textilií je důležité hodnotit interakci vláken zejména s vodou. Kromě výše zmíněných procesů sorpce zde dochází také k vázání molekul vody kapilárními silami. Množství kapilárně vázané vody většinou řádově převyšuje množství vody vázané sorpcí ve vláknech [50].

Smáčivost společně se vzlínavostí tedy patří k nejdůležitějším parametrům pro transport kapaliny v textiliích. Smáčivost je v některé literatuře definována jako první dojem textilie, když se dostane do styku s kapalinou, avšak „vzlínavost“ označuje schopnost udržet kapilární pohyb. To nastává ve chvíli, když jsou vlákna s kapilárními prostory mezi nimi smáčena kapalinou. Výsledné kapilární síly táhnou kapalinu do kapilárních prostorů. Smáčivost je tedy hlavním předpokladem pro vznik vzlínání [50, 53, 54].

Interakce mezi silami soudržnosti (v kapalině) a síly adheze (mezi vlákny a kapalinou) určují, zda dochází ke smáčení nebo ne, a také určuje rozprostření a adsorpci kapaliny na povrchu textilního materiálu. Na převedení molekuly kapaliny z jejího nitra na povrch je nutné vynaložit energii k překonání kohezních přitažlivých sil. Proto zaujímají kapaliny tvar s minimálním povrchem [53].

Ke smáčení dochází v případě, že je vlákno s kapalinou pouze v částečném styku, smáčení je tedy výsledkem energetických interakcí tří fází v rovnováze – tj. pevné látky, kapaliny a plynné fáze (okolní vzduch). Míra smáčivosti je tedy dána dotykovým úhlem a povrchovým napětím, které vzniká na rozhraní textilie, vody a vzduchu. Na textiliích s nepatrnou smáčivostí vytvoří kapalina kulatou kapku, povrchové napětí je zde velmi vysoké. Pokud klesá povrchové napětí, kapka se více rozšiřuje a dotykový úhel kapky se zmenšuje. Je-li dotykový úhel menší než  $90^\circ$  nastává smáčení, pokud je úhel větší, označujeme textilie jako vodoodpudivé, viz obrázek 8 [57].



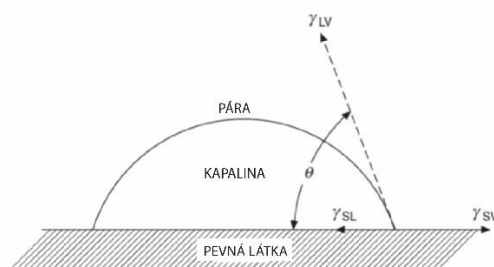
Obr. 8 Transport vlhkosti skrz textilie [56]

Pro smáčivé kapaliny tedy platí, že přitažlivost k tuhému povrchu (adheze) je větší než přitažlivé síly (koheze) v kapalině [55].

Následující Young Duprého rovnice (60) popisuje rovnováhu sil na rozhraní tří fází [55].

$$\gamma_{SV} - \gamma_{SL} = \gamma_{LV} \cdot \cos\theta \quad (60)$$

Mezifázové napětí reprezentuje veličina  $\gamma$ . Toto napětí existuje mezi různými kombinacemi pevné, kapalné a plynné,  $\theta$  je tzv. Youngův kontaktní úhel [58]. Veličina  $\gamma_{LV}$  tedy označuje povrchové napětí na rozhraní kapalina a vzduch (pára),  $\gamma_{SV}$  označuje povrchové napětí na rozhraní pevná látka a vzduch (pára) a  $\gamma_{SL}$  označuje povrchové napětí na rozhraní pevná látka a tekutina [50]. Tato rovnice platí pouze pro kapku spočívající v rovnováze na hladkém, homogenním, nepropustném a nedeformovatelném povrchu. Obrázek 9 reprezentuje rovnovážný stav kapky kapaliny na pevném povrchu [54, 55]



Obr. 9 Rovnovážný stav kapky kapaliny na pevném povrchu [55]

Problematika smáčení textilií je však díky heterogennímu povrchu textilních útvarů mnohem složitější. Proces smáčení textilií tedy závisí nejen na povaze smáčecí kapaliny, ale především na povrchové energii textilie. Tato energie je úzce spojena se strukturou, průřezem, povrchovou čistotou a molekulární orientací vláken, příze, textilie, plošnou hmotností, drsností povrchu a mnoha dalšími vlastnostmi [56].

Vztahem (61) mezi drsností a smáčením se zabýval ve své práci v roce 1936 Wenzel [59]. V případě, kdy má pevná látka určitý stupeň drsnosti, je nutné definovat tzv. zdánlivý kontaktní úhel  $\theta^*$ . Kosinus tohoto úhlu je funkcí drsnosti pevné látky  $f_F$  a kontaktního úhlu, kterého by bylo dosaženo v případě ideálního hladkého povrchu stejné pevné látky [59].

$$\cos\theta^* = f_F \cdot \cos\theta \quad (61)$$

Na jeho studii navazuje práce Cassie a Baxtera [60], která analýzu z předchozí studie [59] rozšířila o porézní povrchy. Rovnice (62) popisuje případ heterogenního porézního povrchu, což lze aplikovat i u textilu v případě, že pod kapkou vody zůstávají tzv. vzduchové kapsy [56]. Indexy v rovnici značí jednotlivé rozdílné oblasti (například část textilie smočená kapalinou a část, kde je kapalina v kontaktu se vzduchovou mezerou),  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  značí poměrné část dané oblasti.

$$\cos\theta^* = \phi_1 \cos\theta_1 + \phi_2 \cos\theta_2 \quad (62)$$

### 4.3 Vzlinavost

“Vzlinavost je schopnost textilních materiálů pohlcovat a přenášet kapalinu působením kapilární síly” [51, s. 29].

Důležité je si uvědomit, že oproti klasické kapiláře tvoří textilie, či samotná příze uzavřené kapiláry, jako je tomu v rostlinách, lidském těle či jiných systémech, ale tvoří tzv. „otevřený“ kapilární systém. Tekutina z klasické kapiláry nemůže téci do strany, proto jednoduše vzliná pouze v jednom směru. Avšak v přízích nejsou pevné stěny a kapalina je zde udržována pouze povrchovým napětím [61].

Z hlediska oděvního komfortu je vzlinavost důležitou vlastností materiálů pro odvod vlhkosti pod oděvem a je závislá především na velikosti pórů a jejich tvaru. Zatímco smáčení je výsledkem pouze energetických interakcí tří fází (pevné látky, kapaliny a vzduchu) v rovnováze, proces vzlinání souvisí nejen s energetickou interakcí, ale i s geometrií vlákenného svazku a dochází při něm ke vzlinání kapilárním transportem v pórech mezi vlákny [50, 61].

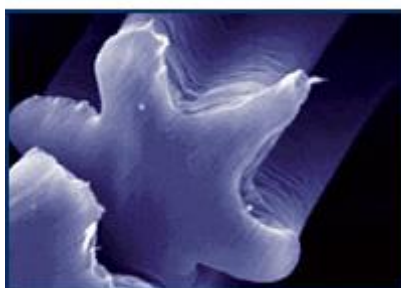
Množství kapilárně vázané vody obvykle řádově převyšuje množství vody vázané sorpcí ve vláknech. Ke zvětšení povrchu kapaliny o jednotku plochy je třeba vynaložit práci odpovídající povrchové energii mezi kapalinou a vzduchem. Tato energie odpovídá povrchovému napětí mezi kapalinou a vzduchem [50].

Velikost kapilárního tlaku je popsána Laplaceovou rovnicí aplikovanou na idealizovanou kapiláru dle vztahu (63), kde  $r_K$  označuje poloměr kapiláry [62].



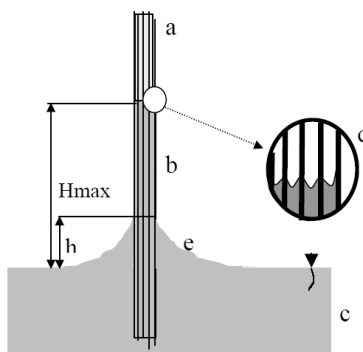
$$\Delta p = \frac{2 \cdot \gamma_{LV} \cdot \cos \theta}{r_k} \quad (63)$$

Na tomto principu funguje i tzv. stromový (knotový efekt), kdy je rychlý odvod vlhkosti podpořen rozdílnými poloměry kapilár v jednotlivých vrstvách textilie, u pokožky je ekvivalentní průměr největší a směrem od těla nositele se zmenšuje. Tím se vytvoří tlakový spád a zvýší se přenos kapalné vlhkosti. Z hlediska odvodu kapalné vlhkosti je tedy žádoucí mít prostor mezi vlákny co nejmenší, struktura příze by měla být kompaktní a zároveň adheze mezi vlákny a kapalinou dostatečně malá, aby byl zajištěn pohyb vlhkosti. K tomu napomáhají i speciální tvarovaná syntetická vlákna jak je patrné například na obrázku 10, která mají speciální tvar průřezu, jako je například COOLMAX, MOIRA, atd [10].



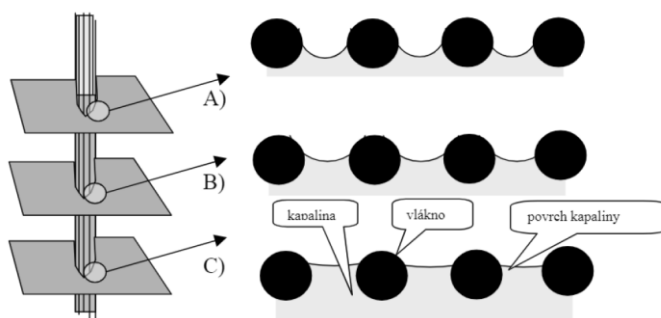
Obr. 10 Průřez speciálně tvarovaným polypropylénovým vláknem MOIRA TG 900 [63]

Na obrázku 11 jsou dobře patrné jednotlivé oblasti vztlínání kapaliny do textilie. Část a) zobrazuje svazek vláken = segment bez kapaliny, část b) svazek vláken = segment s kapalinou, c) zobrazuje kapalinu, d) přibližuje dvourozměrný řez útvarem a e) označuje tzv. přechodovou oblast mezi smočenými vlákny a povrchem vzdálené kapaliny. Je-li vlákno a kapalina v rovnováze, vyvzlíná kapalina právě do výšky  $H_{\max}$  [61].



Obr. 11 Vztlínání kapaliny do svislé textilie [61]

Další obrázek zobrazuje vliv hydrostatického podtlaku (výšky  $H$ ) na křivost povrchu kapaliny na povrchu svazku vláken [61].



Obr. 12 Vliv hydrostatického podtlaku (výšky) na křivost povrchu kapaliny na povrchu svazku vláken [61]

Situace A) zobrazuje oblast téměř ve výšce  $H_{max}$  nad volnou hladinou kapaliny, velmi malý poloměr křivosti umožní spojit pouze velmi blízká vlákna, naopak C) zobrazuje situaci v malé výšce nad vodní hladinou, je zde nízký hydrostatický podtlak, proto je zde velký poloměr zakřivení volného povrchu kapaliny [61].

Hydrostatický tlak v kapalině je kompenzován tlakem, který je vyvolán zakřivením povrchu volné kapaliny. Veličina  $H$  zde označuje výšku. Na základě Laplaceovy rovnice lze poloměr křivosti (zakřiveného povrchu kapaliny)  $r_L$  vyjádřit pomocí rovnice (64) [61].

$$r_L = \frac{\gamma_{LV}}{H \cdot g \cdot \rho} \quad (64)$$

Veškeré výše uvedené výpočty se týkají idealizovaného zjednodušeného tvaru vlákna (příze), u kterého se předpokládá stejnoměrnost a rovnoměrný tvar průřezu. Ve skutečnosti je však příze mnohem složitější útvar, navíc u některých vláken dochází vlivem vlhkosti i k bobtnání a tím pádem zmenšení velikosti pórů. Neméně důležitý faktor, který ovlivní velmi výrazně tvar pórů, je počet zákrutů [61].

Mezi studie, které se zaměřují právě na vliv počtu zákrutů v přízi na vztlínání, patří například práce z roku 2008 [64]. Pro experimentální vyhodnocení navrženého modelu je zde provedeno mnoho experimentů na polyesterových přízích. Ve studii prezentovaný teoretický model je v relativně dobré shodě s naměřenými daty. Samotní autoři však připouští, že zakroucená příze je mnohem složitější než idealizovaný model pomocí válců. Skutečná kroucená příze vykazuje jistou nerovnoměrnost, především u přízí ze střížových vláken mohou vlákna migrovat v radiálním směru a kapiláry mezi vlákny pak nebudou spojit. Kromě toho, ve chvíli, kdy se textilie opatřuje vysokým zákrutem, dochází k výkyvu vláken ze středu příze v důsledku zkroucení. To může poškodit strukturu pórů mezi vlákny a ovlivnit chování kapaliny při vztlínání. Proto je vztlínání textilních přízí velmi složité a špatně predikovatelné.

Ve studii z roku 2012 [65] vyhodnocovali autoři vliv různých pletených struktur z akrylových vláken s rozdílnými konstrukčními parametry na výšku vzlínání, kontaktní úhel a jiné vlastnosti. V závěru studie potvrzují, že konstrukční parametry pletenin mohou výrazně ovlivnit komfortní vjem uživatelů.

Souvislostí mezi vzlínavostí a absorpční kapacitou se zabývá studie [66], která zkoumá vliv průřezu polyesterového vlákna na absorpci vody a kinetiku sorpce. Dle výsledků z této studie nemá tvar průřezu významný vliv na množství absorbované vlhkosti, avšak významně ovlivní kinetiku sorpce, jak je zmíněno v následující kapitole.

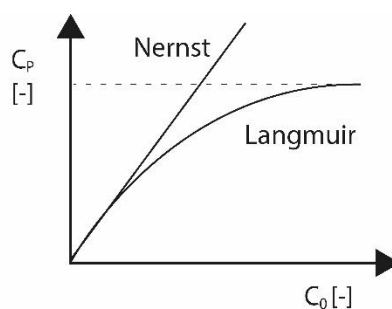
Mírou vzlínání v různých směrech, porovnáním hmotnosti absorbované kapaliny s výškou vzlínání a rychlostí absorbované tekutiny u bavlněných tkanin se zabývá studie z roku 2015 [67]. Z výsledků experimentů provedených na bavlněných textiliích vyplývá následující: rychlost vzlínání u bavlněných tkanin ve směru útku je ve srovnání s osnovou vyšší, zejména na začátku procesu vzlínání, přírůstek hmotnosti absorbované na centimetr textilie byl nepřímo úměrný výšce vzlínání a hmotnost absorbované vody v tkaninách neměla významný rozdíl ve směru útku a osnovy. Autoři zmiňují, že by bylo vhodné provést více studií zabývajících se hygroskopičností produktu a účinkem vzlínání [67].

#### 4.4 Rovnovážná sorpce

Pro získání informací o vzájemném působení molekul penetrantu s povrchem vlákna slouží tzv. adsorpční izotermy. Ty sledují závislost mezi množstvím penetrantu na povrchu vlákna  $C_P$  a v jeho okolí  $C_O$ . Základním předpokladem je, že v okolí nedochází vlivem sorpčních procesů ke změně koncentrace, tj.  $C_O$  je konstantní. Teplota je během experimentu konstantní. Následující Nernstův vztah (65) popisuje případ, kdy se penetrant váže na povrch fyzikálními silami nebo je vláknem absorbován.

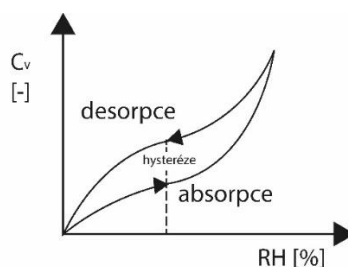
$$C_P = K_N \cdot C_O \quad (65)$$

Veličina  $K_N$  v rovnici označuje rozdělovací koeficient. V odborné literatuře se pak lze setkat i s dalšími modifikacemi tohoto vztahu [50]. Obrázek 13 ukazuje porovnání Nernstovy a Langmuirovy sorpční izotermy.

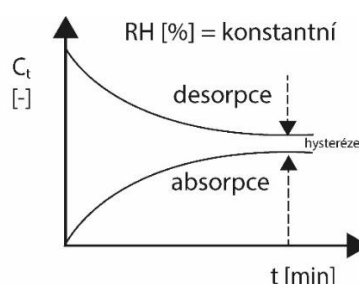


Obr. 13 Porovnání Nernstovy a Langmuirovy sorpční izotermy [50]

Graf na obrázku 14 prezentuje závislost rovnovážné koncentrace vody v hydrofilním vlákne  $C_v$  na relativní vlhkosti vzduchu  $RH$ , graf na obrázku 15 pak sorpční a desorpční izotermu při konstantní relativní vlhkosti.



Obr. 14 Absorpční izoterma vodní páry v hydrofilním vlákne [50]



Obr. 15 Izotermní kinetika absorpce a desorpce vlhkosti ve vlákne [50]

U vlákenných svazků dochází k ustálení rovnováhy mnohem později, než je tomu u samotných vláken. Militký ve své práci [50] uvádí, že doba ustálení je přímo úměrná čtverci celkové tloušťky vlákenného svazku. Během absorpce dochází k uvolňování sorpčního tepla a bobtnání vláken. Například u sorpce vodní páry dochází k ustálení až po více než 24 hodinách (při běžných teplotách).

Hystereze označuje rozdíl mezi absorpční a desorpční izotermou při dané relativní vlhkosti vzduchu, nejčastěji při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti vzduchu 65 %. Výrazná hystereze je ovlivněna především různým počtem přístupných vazných míst při sušení mokrého vlákna nebo při vlhčení suchého vlákna. K hysterezi dochází také v případě, že jsou ve vlákne jednotlivé póry otevřené na obě strany nebo tzv. lahvovité póry (to bývá důvodem hystereze právě hydrofobních vláken). V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty hystereze pro vybraná jednotlivá vlákna [50].

Tab. 4 Hystereze vláken při  $t_a = 20\text{ °C}$  a  $RH = 65\text{ %}$  [50]

Vlákno	Hystereze [%]
bavlna	0,9
viskóza	1,8
vlna	2
diacetát	2,6
polyamid	0,25

Z hlediska termodynamiky je tedy sorpce proces exotermický, dochází u něho k uvolňování tepla. Hystereze se využívá především tam, kde je požadavek minimální nebo naopak maximální vlhkosti ve vláknech při dané relativní vlhkosti vzduchu. Například ve zkušebnictví se začíná z vysušeného stavu vláken a až následně se vlákna zavlhčují na předepsanou relativní vlhkost vzduchu pro zkoušení textilií [50].

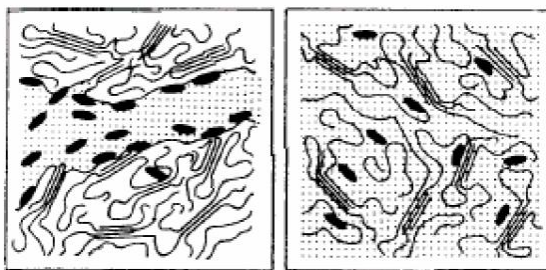
## 4.5 Kinetika sorpce

Kinetika sorpce hraje výraznou roli i pro určení doby sušení textilií. Z hlediska interpretace a aplikace obecných principů je vhodné zajistit izotermní podmínky pro sledování a popis tohoto jevu. V praxi jsou však běžné i neizotermní podmínky, které se vyskytují například u procesu barvení. Pro popis kinetiky sorpce z makroskopického hlediska se používá tzv. rychlostní model, jeho obecný zápis ukazuje rovnice (66). Tento model je vhodný v případě, když lze určit pouze celkové množství penetrantu ve vláknech  $M_t$  v různých časech [50].

$$\frac{dM_t}{d\tau} = -K \cdot (M_R - M_t)^n \quad (66)$$

Veličina  $K$  zde označuje rychlostní konstantu sorpce a  $M_R$  označuje rovnovážné množství penetrantu ve vláknech. Ve většině případů se počítá kinetika sorpce prvního řádu, proto se za  $n$  dosadí číslo 1, po integraci získáme závislost exponenciální [50].

V případech, kdy lze identifikovat rozhodující procesy, které ovlivňují makroskopickou kinetiku, se používají speciální, např. difuzní modely (viz obrázek 16). Tyto modely vycházejí z Fickových zákonů difuze. U polymerů je však nezbytné uvažovat také vliv jejich struktury na rychlost difuze [50].



Obr. 16 Základní modely difuze v polymerech – v pórech a volnými objemy [50]

Jsou-li splněny následující podmínky (energie segmentů polymerních řetězců je postačující pro vytvoření volného objemu - díry dostatečné velikosti pro penetrant a zároveň má molekula penetrantu energii, která je k přeskočení do volného objemu potřeba) dojde podle známé volno-objemové teorie k transportu molekuly penetrantu do polymeru.

Celý tento proces nastává jen při teplotě  $T_D$ , která je nutná pro překonání energetické bariéry bránící oddálení polymerních segmentů. Popsaný model lze aplikovat na celou řadu syntetických vláken se zanedbatelnou porozitou. U vláken přírodních či porézních syntetických lépe odpovídá model difuze v pórech, který vychází z Fickova zákona o difuzi, kdy je hnací silou celého procesu gradient koncentrace místo gradientu chemického potenciálu. Obecně lze vyjádřit závislost difuzního koeficientu na teplotě Arrheniovskou rovnicí (67) [50].

$$D = D_0 \cdot e^{\frac{-\Delta E}{RT}} \quad (67)$$

V rovnici  $D_0$  označuje konstantu související s entropií systému,  $E$  je aktivační energie difuze a  $R$  je univerzální plynová konstanta [50].

Zjednodušeně lze říci, že nad  $T_D$  probíhá difuze volno-objemovým mechanismem. Pokud je však teplota nižší, dochází k difuzi v mikropórech či mikrotrhlinách na povrchu vláken. Díky závislosti difuzního koeficientu na teplotě je tedy možné určit mechanismus difuze. V případě sledování pronikání plynů a par do textilních vláken (obecně polymerů) za běžných teplot dochází ke kombinaci modelů adsorpce s modely difuze [50].

## 4.6 Tepelné jevy při sorpci

Dochází-li k sorpci vody do vláken z vodní páry, předchází tomuto procesu kondenzace vodní páry na povrchu vlákna. Podle typu vlákna a relativní vlhkosti vzduchu se část kapalné vlhkosti absorbuje dovnitř vlákna, do jeho struktury a dochází k tvorbě sekundárních vazeb. Přebytečná energie se uvolní jako sorpční teplo. Ostatní vlhkost zůstává na povrchu vlákna a vzlíná kapilárními cestami [50].

Rozlišujeme tzv. diferenciální sorpční teplo a integrální sorpční teplo. První jmenované označuje množství tepla uvolněné sorpcí 1 g kapaliny při dané relativní vlhkosti vzduchu. Největší sorpční teplo je u vláken, která jsou na počátku děje vysušena. Integrální neboli smáčecí teplo označuje množství tepla uvolněné při úplném nasycení 1 g vláken při dané relativní vlhkosti vzduchu. Nejvyšších hodnot dosahuje pro vlákna vysoce navlhavá (například vlna a viskóza) [50].

## 4.7 Propustnost vodních par a odvod vlhkosti skrz celý oděvní systém

Propustnost vodních par je schopnost textilií propouštět vlhkost ve formě páry skrz textilii do okolního prostředí. Tuto vlastnost významně ovlivňuje relativní vlhkost okolního vzduchu a teplota. Z hlediska oděvního komfortu je to významná vlastnost oděvů. Při zjišťování propustnosti textilií pro vodní páry je hnacím mechanismem rozdíl jejich parciálních tlaků na obou stranách textilie.

Pro určení propustnosti se počítá množství vlhkosti, které projde skrz textilii za daných klimatických podmínek, nebo se vychází z odporu textilie proti průniku vodních par [10].

V evropských státech se v současnosti aplikuje metoda podle normy ISO 11092 [68], ve které se měří tzv. výparný odpor pomocí vyhřívané desky. Tato metoda dává spolehlivé výsledky a je tedy preferována v textilním průmyslu před metodami gravimetrickými, které jsou popsány v práci [69].

Stanovení výparného odporu vychází z rovnice (68) uvedené v publikaci [10].

$$R_{et} = (p_p'' - p_p) \cdot (\dot{q}_1^{-1} - \dot{q}_0^{-1}) \quad (68)$$

Jednotlivé hustoty tepelných toků ( $\dot{q}_0$  a  $\dot{q}_1$ ) označují hustotu tepelného toku vznikající odparem z volné hladiny a hustotu tepelného toku při zakrytí této textilie vzorkem. Veličina  $p_p''$  označuje parciální tlak vodní páry při jejím nasycení a veličina  $p_p$  pak parciální tlak vodní páry v okolí.

Oproti tomu gravimetrické metody vycházejí z absolutního množství par, které projdou skrz textilii za určitý časový úsek, většinou za dobu 24 hodin. Jednotlivé metody se od sebe liší především podmínkami měření a použitým měřicím zařízením, podrobněji se touto problematikou zabývá například [69].

Základním matematickým vyjádřením pro hodnocení rychlosti průtoku kapaliny nasycenou zónou pevného porézního tělesa je Darcyho zákon, který popisuje rychlost průtoku kapaliny nasycenou zónou pevného porézního tělesa. Jedná se o lineární závislost mezi filtrační rychlostí kapaliny a piezometrickým (hydraulickým) gradientem. Odvodil ji francouzský inženýr Henry Darcy v roce 1856, který ji vyjádřil rovnicí (69) [70].

$$v = \frac{k}{\eta} \cdot \frac{(dp)_c}{dx} \quad (69)$$

Kde  $v$  zde označuje rychlost kapaliny a  $k$  je propustnost, která popisuje, jak snadno teče voda v kapalném skupenství prostřednictvím porézních materiálů,  $\eta$  je dynamická viskozita postupující kapaliny a  $p$  je kapilární tlak, který je hnací silou pro pohyb kapaliny.

Aby bylo možné použít Darcyho rovnici pro aplikaci v textilu, musí být známy hodnoty propustnosti a kapilárního tlaku [71].

V porézním prostředí, jakým jsou i textilie, je situace značně složitá díky křivolakosti (turtuositě) jednotlivých pórů, která průchod vlhkosti skrz oděvní systém zpomalí [10]. Stanovení hodnot propustnosti bylo předmětem i studie [71] z roku 1994, kde se autoři zabývali návrhem metody pro měření kapilárního tlaku a propustnosti, které jsou pro modelování pohybu kapaliny v textiliích zásadní. Autoři ve studii využívali k ověření metody textilie z bavlny a polypropylénu, avšak zmiňují, že lze metodu aplikovat na širokou paletu textilií.

V odborných člancích, které se týkají hodnocení termofyziologického komfortu, se měření paropropustnosti objevuje ve velké míře, viz například v předchozích kapitolách uvedené studie [14, 16, 19, 24 a 41]. Většina autorů se zaměřuje na hodnocení této vlastnosti pouze u suchých (klimatizovaných) vzorků a opomíjí hodnotu paropropustnosti vzorků vlhkých. Při sportovních činnostech se většina uživatelů v důsledku zvýšené sportovní aktivity začne potit, textilie se potem zavlhčí a její vlastnosti se oproti vlastnostem v klimatizovaném stavu významně změni.

V roce 2014 vznikla studie [72], které se zabývala tepelným komfortem při nošení vlhkých oděvů. Studie porovnává standartní parametry komfortních vlastností jako je například tepelný odpor, paropropustnost a tepelná jímavost nejen v suchém stavu, ale také v mokrému stavu, kde zdůrazňuje významný rozdíl jednotlivých naměřených hodnot. Většinou se hodnoty těchto vlastností u spodního prádla v suchém stavu výrazně neliší, ale při porovnání těchto vlastností po fyzickém výkonu nositele (tj. za mokra) dosahují jednotlivé komfortní vlastnosti významných rozdílů. Pro účely experimentu vybrali autoři 12 dresů z různých vláken. Vlhčení dresů probíhalo pomocí tréninku sportovce na běžícím pásu za přesně definovaných podmínek. Následně byly dresy zváženy a bylo stanoveno procentuální zavlhčení dresů a změřeny jednotlivé komfortní parametry za vlhka. Dle výsledků této studie byl stanoven tzv. "Index tepelného komfortu za vlhka".

Podle závěru studie lze tvrdit, že termofyziologické komfortní vlastnosti spodního prádla mohou být díky absorbovanému potu v reálných podmínkách jejich použití podstatně nižší než jejich komfortní vlastnosti v suchém stavu. Stejně tak i rozdíly v naměřených hodnotách mezi jednotlivými dresy v mokrému stavu jsou výraznější. Z výsledků této studie tedy vyplývá důležitost hodnocení komfortních vlastností nejen za sucha, ale také za přesně definovaných podmínek vlhkého stavu textilií.



## 5 Zhodnocení problematiky sušení textilií a dostupné metody

Pátá kapitola porovnává jednotlivé metody, normy, přístroje a přístupy autorů odborných studií k problematice sušení především s ohledem na termofyziologický komfort uživatele.

### 5.1 Stávající metodiky a normy

V současné době mají výrobci textilií a oděvů k dispozici několik metod, dle kterých lze v laboratořích otestovat rychlost sušení textilií. Mezi ně patří:

**AATCC Test Method 195-2009:** *Liquid Moisture Management Properties of Textile Fabrics* [73],

**AATCC Test Method 199-2011:** *Drying Time of textiles: Moisture analyzer Method* [74],

**AATCC Test Method 200-2017:** *Drying Rate of Textiles at their Absorbent Capacity: Air Flow Method* [75],

**AATCC Test Method 201-2014:** *Drying Rate of Fabrics: Heated Plate Method* [76],

**TNI CEN/TR 16422:** *Classification of thermoregulatory properties* [77],

**ISO 17616:** *Textiles: Determination of moisture drying rate* [78],

**JIS L 1096:** 1999 - *Drying speed* [79].

V tabulce 5 jsou uvedené jednotlivé normy a podmínky měření. Je nutné si uvědomit, že teplota měření u vybraných amerických norem [73, 74, 75, 76] činí  $70 \pm 2$  °F, proto po přepočtu vychází teplota  $21 \pm 1$  °C oproti 20 °C u norem evropských.

Tab. 5 Porovnání jednotlivých norem z hlediska klimatických podmínek měření

	$t_a$ [°C]	$t_{destičky}$ [°C]	RH [%]	rychlost proudění [ $m \cdot s^{-1}$ ]	záznam úbytku hmotnosti vzorku během měření
<b>AATCC TM 195-2009</b>	$21 \pm 1$	-	$65 \pm 2$	NE	NE
<b>AATCC TM 199-2011</b>	$21 \pm 1$	37	$65 \pm 2$	NE	NE
<b>AATCC TM 200-2017</b>	$21 \pm 1$		$65 \pm 2$	$2,5 \pm 0,5$	NE, ale zaznamenává se teplota vzorku
<b>AATCC TM 201-2014</b>	$21 \pm 1$	$37 \pm 1$	$65 \pm 1$	$1,5 \pm 0,5$	NE, ale zaznamenává se teplota vzorku
<b>TNI CEN/TR 16422</b>	35	35	30	1 či 2	NE
<b>ISO 17616</b>	$20 \pm 2$	-	$65 \pm 4$	NE	ANO (interval 5 min)
<b>JIS L 1096 - 1999</b>	$20 \pm 2$	-	-	NE	ANO

### **5.1.1 AATCC Test Method 195-2009: Liquid Moisture Management Properties of Textile Fabrics**

Jednou z norem zabývajících se vedením kapalné vlhkosti je **AATCC Test Method 195-2009: Liquid Moisture Management Properties of Textile Fabrics**. Tato zkušební metoda vznikla v roce 2009 a je určena pro měření, hodnocení a klasifikaci vedení kapalné vlhkosti u pletených, tkaných či netkaných plošných textilií. Měření je prováděno na MOISTURE MANAGEMENT TESTERU (dále jen MMT) a výsledky z ní vychází z těchto vlastností textilií: odolnosti vůči vodě a schopnosti absorpce vody s ohledem na strukturu plošné textilie, včetně geometrické a vnitřní struktury a vzlínivosti jednotlivých vláken [73].

Vzorek plošné textilie se umístí mezi dvě vodorovná (horní a spodní) elektrická čidla, každé z nich je opatřeno sedmi soustřednými kruhy jehel. Předem stanovené množství zkušební roztoku se aplikuje na střed horní strany zkušební textilie. Roztok se šíří třemi směry: paprskovitě po horním povrchu, skrz vzorek na spodní stranu a dále paprskovitě po jejím spodním povrchu [73].

Během zkoušky se zaznamenávají jednotlivé změny elektrického odporu zkušebních vzorků. Vyhodnocením změn elektrického odporu se dopočítají změny kapalné vlhkosti v plošné textilií a stanoví se vlastnosti dynamického převodu kapalné vlhkosti ve více směrech. Souhrn jednotlivých naměřených hodnot pak slouží k vyhodnocení a klasifikaci vlastností vedení kapalné vlhkosti pomocí předem daných ukazatelů. Jak se však během mnoha měření ukázalo, není tato metoda spolehlivá pro vzorky, které jsou ze syntetických vláken, ale spíše pro textilie, které jsou z vláken přírodních a jsou tedy savé. Další nevýhodou je směrové hodnocení šíření vlhkosti, které je zde nedostatečné [73].

### **5.1.2 AATCC Test Method 199-2011: Drying Time of textiles: Moisture analyzer Method.**

V roce 2011 byla vydána další norma, která vychází z neoficiálních technik pro stanovení vysoušecích vlastností již dříve uvedených v AATCC / ASTM: Vedení vlhkosti - technická příloha (aplikace na textilní zboží) pod názvem **AATCC Test Method 199-2011: Drying Time of textiles: Moisture analyzer Method** [74].

K provedení testu se využívá analyzátor vlhkosti, zde je možné nastavit různou teplotu. Standardně se zde uvádí teplota testování 37 °C a relativní vlhkost 65 ±2 %. V této metodice chybí možnost regulace rychlosti proudění vzduchu. Norma je určena především k porovnání vedení vlhkosti u textilií před a po aplikaci konečné úpravy, není vhodná k měření komfortních vlastností. Norma uvádí, že není použitelná pro textilie, které vykazují savost delší než 30 sekund. K provedení testu se využívá analyzátor vlhkosti. Nelze zde však opět nastavit rychlost proudění. Podle této normy lze testovat jakékoliv tkané, netkané i pletené textilie. Sušení lze provádět při teplotách simulující lidskou pokožku, nebo oblast použití [74].

Vzorky se nejprve klimatizují podle normy ASTM D 1776. Poté je třeba nastavit teplotu na 37 °C a počkat 30 minut. Následně se vzorky zváží a poté postupně ponoří do kádinky s destilovanou vodou pomocí pinzety po dobu 1 minuty. Vzorek se vyndá z vody a umístí na vertikální držák, kde se nechá 5 minut volně schnout. Vzorek se zváží a zaznamená. Rozdíl hmotností vztažený k hmotnosti před vlhčením udává procentuální zavlhčení vzorku, zde označovaná jako retenční vlhkost [74].

Vzorek se umístí do analyzátoru vlhkosti na drátěnou mřížku. Na vzorek se pomocí elektronické pipety nanese množství vlhkosti. Na vzorek se umístí druhá drátěná mřížka a spustí se analyzátor vlhkosti. Analyzátor vlhkosti nebo software automaticky ukončí test při dosažení koncového bodu. Koncovým bodem je označen stav, kdy je hmotnost textilie o 4 % vyšší, než byla její hmotnost ve vysušeném stavu. Vyhodnocuje se celkový čas sušení [74].

### **5.1.3 AATCC Test Method 200-2017: Drying Rate of Textiles at their Absorbent Capacity: Air Flow Method**

O rok později vychází norma **AATCC Test Method 200-2017: Drying Rate of Textiles at their Absorbent Capacity: Air Flow Method**, ve které je poprvé zahrnutý i vliv rychlosti proudění na dobu sušení textilií [75]. Metoda je opět omezena pouze pro textilie, které vykazují maximální dobu nasákavosti 30 sekund měřeno testovací metodou AATCC 79 [80].

Rychlost sušení textilií se vyhodnocuje na základě rychlosti odpařování. Standardně se při této metodě používá rychlost proudění  $2,5 \pm 0,5$  m přes otvor o průměru  $13 \pm 0,1$  cm. Princip této metody spočívá v měření teploty navlhčené textilie pomocí IR sondy (infračervené sondy). Nejprve se určí retenční vlhkost textilie jako v předchozí normě [74]. V tomto případě se však množství vody aplikuje pipetou na vzorek upnutý v rámečku. Voda ze vzorku nesmí odkapávat. Pokud začne protékat skrz, je nutné test opakovat s menším množstvím aplikované vody (snížení objemu vody o 10%). Poté je zahájeno testování. Textilie je upnutá v kruhovém rámečku, pod kterým je umístěn ventilátor o rychlosti proudění  $2,5 \pm 0,5$  m·s<sup>-1</sup> a zavlhčena vypočítaným množstvím vody (to musí být nižší nebo stejné, jako jeho zjištěná retenční vlhkost) [75].

Sonda IR termočlánek se umístí 1 cm nad vzorek a během měření se kontroluje a zaznamenává rychlost proudění pomocí anemometru. Během samotného testování se každou vteřinu zaznamenává teplota vzorku, až do jejího návratu na původní hodnotu. Naměřené hodnoty se vynesou do grafu teplota versus čas a pomocí průsečíku dvou přímek, z nichž první prochází sedmi datovými body v nejprudší části grafu a druhá přímka se prokládá plochou částí grafu za ohybem, se určuje koncový čas sušení. Doba sušení je rozdíl mezi koncovým časem a časem zahájení měření. Poté je vypočítána rychlost sušení [75].

#### **5.1.4 AATCC Test Method 201-2014: Drying Rate of Textiles at their Absorbent Capacity: Air Flow Method**

Další americkou normou zabývající se sušením textilií je norma **AATCC Test Method 201-2014: Drying Rate of Fabrics: Heated Plate Method**. Tato metoda určuje rychlost sušení textilie, navlhčené předepsaným množstvím vody, přičemž je textilie v přímém kontaktu s vyhřívanou destičkou při teplotě 37 °C. Po celou dobu zkoušky je vzorek ofukován, přičemž proudění vzduchu je nastaveno na  $1,5 \pm 0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Měření průtoku vzduchu probíhá přímo za IR (=infračervený) termočlánkem. Zkušební vzorek se umístí na kovovou desku stranou, která má být v těsné blízkosti pokožky, po dobu pěti minut, aby se vzorek vytemperoval na teplotu plechů [76].

Do středu vzorku  $1,0 \pm 0,1 \text{ cm}$  nad vzorek se umístí IR termočláneková sonda, poté se pod vzorek aplikuje  $0,2 \pm 0,003 \text{ ml}$  vody na desku pod vzorkem přímo pod IR termočlánek. Vzorek vrátíme na desku tak, aby ležel přímo na kapce vody pod IR sondou. Počáteční čas je doba, kdy se vzorek dostane do styku s vodou. Poté se každou vteřinu zaznamenává teplota až do doby, dokud se teplota vzorku nevrátí na původní teplotu. Z naměřeného průběhu změny teploty textilie se vyhodnotí koncový bod sušení. Vyhodnocení probíhá stejným způsobem jako u předchozí metody [76].

Také tato metoda nedokáže spolehlivě určit konec sušení, resp. množství vlhkosti obsažené v textilii. Vzhledem k tomu, že každý materiál má jiný průběh sušení, je velmi těžké podle ní jednotlivé textilie s různým materiálovým složením porovnat [76].

#### **5.1.5 TNI CEN/TR 16422: Klasifikace termoregulačních vlastností**

V soupisu norem z roku 2015 **TNI CEN/TR 16422: Klasifikace termoregulačních vlastností** je uvedena tzv. **BPI metoda (Buffering capacity of liquid sweat and sweat transport)** - převod kapalného potu a vyrovnávání kapalného potu, která využívá zařízení pro měření výparného a tepelného odporu, tzv. malého skin modelu. U této metody je již zahrnuto jednak proudění vzduchu a také ohřívání materiálu během procesu sušení, které simuluje efekt sušení na pokožce nositele. Testování se provádí na vyhřívané destičce, která simuluje efekt pocení [77].

Teplota destičky se nastaví na 35 °C, relativní vlhkost okolního vzduchu na 30 %. Na destičku se umístí fólie, která brání průniku vlhkosti i vodních par, na ni se následně umístí polyesterová tkanina. Ta napodobuje potící se lidskou pokožku pomocí aplikace  $15 \text{ cm}^3$  vody o teplotě 35 °C. Následně se na ni položí zkušební vzorek. Přesně po 15 minutách se zkušební vzorek vyjme. Během zkoušky tak zkušební vzorek jednak absorbuje z podložené tkaniny vodu a také skrz něj prostupují vodní páry, které se z polyesterové tkaniny během zkoušky odpařují. Po 15 minutách se test ukončí a vzorek zváží. Z dané hodnoty lze určit množství odpařené vlhkosti za 15 minut. Výhodou metody je její rychlost, nenáročnost, avšak výsledek měření nevypovídá nic o průběhu či konci sušení [77].

### 5.1.6 ISO 17616: Textiles: Determination of moisture drying rate

Norma, která přímo popisuje průběh měření rychlosti sušení vlhkosti v textilním materiálu a je určena k zobrazení sušících charakteristik textilií po navlhčení potem díky lehké sportovní aktivitě, či běžné životní situaci se nazývá: **ISO 17616: Textiles: Determination of moisture drying rate** a používá se pro textilie, u kterých je potřeba stanovit rychlost sušení [78].

Vhodné pouze pro vzorky, u nichž je čas vsáknutí kapky pod 60 sekund. Test savosti se provede tak, že se aplikuje pipetou kapka vody o objemu  $0,03 \pm 0,01$  ml a změří se čas, dokud nebude kontaktní úhel mezi kapkou a textilií nižší než  $45^\circ$ .

Pro stanovení rychlosti sušení se využívají váhy a 3 typy zavěšení vzorků. Všechny váhy jsou zakrytované, tudíž je zde opět opomíjen vliv proudění okolního vzduchu. Pro všechny způsoby měření se vzorek zavlhčí definovaným množstvím vody, umístí na váhy a nechá schnout. Měření hmotnosti se opakuje každých 5 minut  $\pm 15$ s, dokud neuplyne 60 min nebo dokud zbývající hmotnost vody klesá na více než 10 % počáteční hmotnosti vody. Poté je test ukončen a jsou vyhodnoceny sušící křivky [78].

V normě jsou uvedeny tři způsoby zavěšení vzorku, vertikální – metoda A1 a A2 a horizontální způsob sušení označený jako metoda B. U metody A1 je vzorek zavěšený na rámu na váze, která měří zespodu, kdežto u metody A2 je umístěn na váze, která měří zeshora. Avšak ve všech variantách je vzorek vystaven testovacímu ovzduší z obou stran.

### 5.1.7 JIS L 1096: 1999 – Drying speed

Na stejném principu jsou založené i metody a normy používající se na území asijských zemí, které jsou popsány v normě **JIS L 1096: 1999 – Drying speed** [79].

V této normě jsou uvedeny dva způsoby měření: metoda 1 a metoda 2.

U metody 1 se používá pro testování jednoduchý přístroj založený na měření hmotnosti vzorku během sušení. Vzorek o rozměrech 40 x 40 cm se zavěsí na jednoduchý aparát, který zaznamenává průběh sušení pomocí grafu. Měření probíhá při standardních podmínkách, přičemž není zajištěna konstantní rychlost proudění okolního vzduchu. Měření probíhá postupně na třech vzorcích. Na začátku jsou vzorky ponořeny do vody o teplotě  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  a po určité době jsou vyndány a zavěšeny na měřicí aparát. Ve chvíli, kdy už se nemění hmotnost vzorku, je měření ukončeno. Následně se spočítá průměrná hodnota ze tří měření [79].

Metoda 2 se liší od první metody tvarem zkušebních vzorků (vzorky mají  $202,5\text{ cm}^2$ ) a také zařízením pro odečítání hmotnosti. Vzorky jsou nejprve zváženy, následně ponořeny do vody o teplotě  $20^\circ\text{C}$  po dobu 3 nebo více hodin. Deset minut po vyndání z vodní lázně se vzorky zváží a následně se zjistí množství volné vlhkosti v textilií. Počítá se průměrná hodnota ze dvou vzorků.

Vzorek se zavěsí do zkušebního zařízení, na kterém je upevněna váha. Váhy jsou schopny měřit s přesností 10 - 20 mg. Opět se sleduje postupný úbytek vlhkosti. Bohužel zde není blíže specifikován konečný bod měření [79].

Vzhledem k nejednotnosti výše uvedených norem je tedy nutné vytvořit nový způsob testování, který bude mít jednotné podmínky měření a to především teplotu, relativní vlhkost okolí a přesně definovanou rychlost okolního proudění vzduchu. Nový způsob by měl být vhodný jednak pro textilie z přírodních vláken, tak i pro textilie z vláken syntetických a měl by být součástí stanovení komfortních vlastností textilií.

## 5.2 Proces sušení

V praxi často potřebujeme odstranit kapalnou vlhkost z materiálů. Sušení tedy označuje proces, během kterého se odstraňuje kapalina z textilií. Kapalná voda uvnitř póru se postupně mění v páru, která prostřednictvím difuze vstoupí do mezní vrstvy a je odvedena konvekcí. Během procesu sušení tedy dochází ke sdílení tepla i hmoty [81].

V běžném životě sušení významně přispívá k termofyziologickému komfortu nositele v případě zavlhčení oděvu deštěm či potem. V případě sportovních nebo ochranných oděvů je tedy významným parametrem k hodnocení termofyziologického komfortu [72].

Při sušení je vlhkost z vlastního materiálu a v povrchové mezní vrstvě přenášena difuzí, na kterou navazuje odvod vlhkosti konvekcí, a to přirozenou či nucenou. Jak uvádí ve své publikaci Barták, i přes to, že se mechanismus difuze při přenosu vlhkosti uplatní vždy, bývá přehlušen mechanismem konvekce [2].

Během procesu sušení tedy přechází nejprve vlhkost z povrchu materiálu z makro a mezopórů a až následně voda zevnitř materiálu z jednotlivých mikropórů směrem do okolního prostředí [81].

Vlhký materiál je tedy směsí absolutně suché pevné látky a vody. Celkovou koncentraci vlhkosti v materiálu vyjadřuje rovnice (70).

$$W_w = \frac{m_w}{m_F} \quad (70)$$

Kde  $m_w$  označuje hmotnost vody a  $m_F$  hmotnost suchého materiálu [81].

V případě hodnocení procesu sušení z hlediska termofyziologického komfortu se využívá poměr hmotnosti přidané vlhkosti a hmotnosti klimatizovaného vzorku, jak uvádí například [82] [83]. Z hlediska odstranitelnosti můžeme vlhkost v materiálu rozdělit na volnou, kterou lze v daných klimatických podmínkách odstranit například mechanicky (ždímáním) nebo postupným odparem vlhkosti při daných klimatických podmínkách a na rovnovážnou, která v materiálu zůstává i při nekonečně dlouhém sušení materiálu v daném prostředí ( $t_a$ ,  $RH$ ), a je tedy v rovnováze s obsahem vody ve vzduchu.

Hodnota rovnovážné vlhkosti závisí na vlastnostech sušicího vzduchu a na navlhavosti sušeného materiálu. Struktura vláken ještě obsahuje tzv. chemicky vázanou vlhkost, která je obsažena uvnitř struktury vlákna (součástí chemické sloučeniny). Jejím odstraněním by se však porušilo samotné vlákno.

V této práci je však řešen proces sušení textilních materiálů s ohledem na komfort uživatele, proto zde prezentované sušicí křivky vychází z přidané vlhkosti v materiálu vzhledem k jeho klimatizované hmotnosti. Cílem tedy není odstranit rovnovážnou vlhkost ve vláknech, ale pouze vlhkost přidanou.

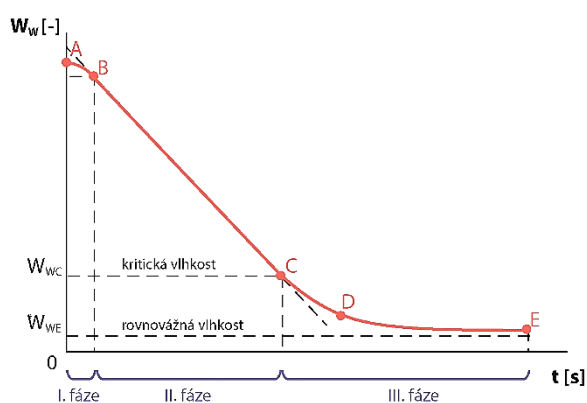
Rychlost sušicího procesu vyjadřuje intenzita hmotnostního toku vlhkosti  $\dot{m}$  (rychlost sušení), kterou vyjadřuje rovnice (71).

$$\dot{m} = \beta_p \cdot \Delta p_p \quad (71)$$

Kde  $\beta_p$  označuje součinitel přenosu hmoty vztažený k rozdílu parciálních tlaků vodní páry, který představuje hnací sílu celého procesu. Pokud bychom zvolili jako hnací sílu rozdíl mezi koncentracemi, je nutné použít součinitel přenosu hmoty  $\beta_C$  [3].

Vzájemný přepočtení mezi jednotlivými součiniteli je uveden v kapitole 2.2.2.

Rychlost sušení závisí především na vnějších podmínkách, za kterých probíhá (relativní vlhkost vzduchu, teplota a rychlost proudění). Průběh sušení lze rozdělit do tří částí, jak je patrné z obrázku 17, který ilustruje průběh sušení. Nutno podotknout, že například v průmyslové sušárně bude průběh teploty sušeného materiálu vzhledem k vysoké teplotě sušicího prostředí odlišný, než je tomu při sušení textilií přímo v klimatických podmínkách laboratoře či v běžném okolním prostředí.



Obr. 17 Závislost obsahu vlhkosti v materiálu  $W_w$  na době sušení v průmyslové sušárně [81]

Na začátku procesu je vlhký materiál uveden do styku s proudem vzduchu, který vykazuje nižší koncentraci vlhkosti než koncentrace vlhkosti na povrchu sušeného materiálu. V tomto okamžiku začíná probíhat proces sušení [81].

**I. Počáteční období sušení** - materiál se začíná ochlazovat na teplotu mokrého teploměru (pokud není dohříván). Tento proces znázorňuje úsek křivky od bodu A k bodu B na obrázku 17. Tato fáze trvá velmi krátkou dobu a často ji ani nepostřehneme [81, 84].

**II. Období konstantní rychlosti sušení materiálu** - doba odpařování nevázané (volné) vlhkosti v materiálu. Během tohoto období je teplota materiálu (teoreticky) také konstantní a hmotnost vlhkosti v materiálu se lineárně snižuje [81, 84].

Jedná se o nejdůležitější fázi procesu sušení z hlediska termofyziologického komfortu uživatele daného oděvu. V této fázi je žádoucí co nejvyšší avšak krátkodobý chladicí efekt, aby na konci tohoto děje dosáhl uživatel tepelně komfortního vjemu. Úroveň rychlosti sušení lze stanovit pomocí koeficientu přenosu hmoty  $\beta$  v závislosti na bezrozměrných číslech Sherwood a Schmidt [85] podle rovnice (41).

Nad povrchem materiálu je v tomto časovém úseku tenze par přibližně stejně velká jako tenze par nad čistou vodou o stejné teplotě. Následuje bod C, kdy se hodnota vlhkosti v materiálu dostává na hranici kritické vlhkosti  $W_{WC}$ . Pro toto období sušení je tedy charakteristické především to, že rychlost sušení závisí na teplotě, relativní vlhkosti a hmotnostním průtoku vzduchu, avšak není ovlivněna druhem materiálu a tloušťkou vrstvy a aktuálním množstvím vlhkosti v materiálu [81]. Autoři studií [82, 86] zabývající se především termofyziologickým komfortem textilií zdůrazňují, že v období konstantní rychlosti sušení hraje významnou roli především struktura povrchu, která ovlivňuje efektivní vlhkosměnnou plochu.

**III. Období klesající rychlosti sušení** - v této fázi se dostanou do kontaktu se vzduchem částice pevného materiálu, rychlost sušení se začíná zpomalovat. V tu chvíli se materiál začíná ohřívat nad teplotu mokrého teploměru, což v obrázku 17 označuje bod D. Protože dráha difundující páry je složitější a odpor proti difuzi tím pádem větší, dochází ke zpomalení děje sdílení hmoty (klesá hybná síla) a zároveň i zpomalení sdílení tepla [81]. Teoretické modely tohoto období lze nalézt například v práci [84].

Děj sdílení tepla a hmoty se zastavuje, protože nelze materiál v klimatických podmínkách okolního prostředí více vysušit [81]. Haghi [84] ve své studii charakterizuje tuto fázi sušení jako první období klesající rychlosti (od bodu C do bodu D) a druhé období klesající rychlosti sušení (od bodu D do bodu E). Povrchová teplota stoupá rychleji v prvním období klesající rychlosti. Bod E označuje stav, kdy vlhkost materiálu dosahuje téměř hodnoty rovnovážné vlhkosti  $W_{WE}$ . Vzhledem k tomu, že by dosažení rovnováhy trvalo nekonečně dlouhou dobu, je tento okamžik považován za konec děje sdílení tepla a hmoty, materiál nelze v daném prostředí více vysušit [81].

Sušícími křivkami se ve své práci zabývali například Günther [87] a Brunello [88], kteří studovali chování při sušení s pevnou vrstvou celulózové buničiny při různých provozních podmínkách. Obě studie řeší vztah teploty a rychlosti sušení a je v nich ověřeno, že počáteční obsah vlhkosti vzorků neovlivňuje rychlost sušení v lineární části sušících křivek.



Na jejich práci navázal Sousa [83], který analyzoval účinek některých procesních proměnných při konvekčním a kondukčně-konvekčním sušení přírodních textilních materiálů. K analýze jsou zde použity dva typy sušících zařízení. První technika spočívá v použití sušící komory upravené ze sušícího modulu všeobecné chemické laboratoře. Bavlněné vzorky jsou umístěny uvnitř sušící komory a jsou vystaveny konvekčnímu proudu horkého vzduchu. Druhé zařízení se skládá z kovové krabice vytápěné termostatickou lázní, na které je varná deska. Na této desce jsou umístěny textilní vzorky a systém je vystaven nucené konvekci okolního vzduchu pomocí nastavitelného ventilátoru.

V práci je sledován vliv počátečního obsahu vlhkosti textilie, sušení (proudem horkého vzduchu a vyhřívanou destičkou), teploty a rychlosti proudění vzduchu na tvar sušících křivek během provozních podmínek. Podrobnosti o experimentálním vybavení a konstrukci sušících křivek lze nalézt ve studii Sousy [89].

V práci [90] byly publikovány zobecněné sušící křivky bavlněných textilií v pásmu klesající rychlosti konvekčního a konduktivně-konvekčního sušení založené na Pageho rovnicích. Metodou generálních sušících křivek založených na správnosti přenosu vlhkosti během procesu sušení se zabývaly také starší studie autorů Krasnikov [91] a Ciesielczyk [92].

Numerickým modelováním se zabýval například ve své studii Yiotis v roce 2005 [93], sušícím procesem v klasické sušárně pak například Hamdaoui ve své práci z roku 2013 [94].

Všechny výše zmíněné studie řeší především teorii sušení a teoretické modely bez vztahu ke komfortním vlastnostem. Není v nich kladen důraz na použitou testovací metodiku, která je předmětem právě této práce. Z tohoto důvodu shrnuje následující rešerše především praktické poznatky týkající se sušení, jakožto testovací metody pro hodnocení vnímání komfortu uživatele především při aktivitách, u kterých dochází k pocení.

### **5.2.1 Hodnocení procesu sušení s ohledem na termofyziologický komfort**

Při hodnocení komfortních vlastností oblečení či textilií je nutné počítat i s tím, že oděv nezůstává stále v suchém stavu, ale při jednotlivých činnostech může navlhnout díky pocení nebo deštivému počasí. Oboje má za následek jednak zvýšení hmotnosti daného oděvu, lepivost oděvu na tělo, chladný a vlhký pocit. Vyšší odvod tepla díky existenci vlhkosti v oblečení může být vnímán jako žádoucí i nežádoucí stav, podle toho v jakých klimatických podmínkách se uživatel pohybuje a jakou podstupuje fyzickou zátěž, viz například studie [41, 43, 44, 45, 46, 47, 95], které ve svých výzkumech zdůrazňují vliv vlhkosti v oděvu na komfort uživatele.

Rychlý odvod kapalného potu skrz textilii na její vnější stranu snižuje možnost ochlazení těla nositele, protože část tepla potřebná k jeho odpaření bude odebíraná pouze z okolního prostředí [48, 96]. Jak uvádí Hes a kol. ve svých studiích [97, 98], platí toto tvrzení pouze v případě volných oděvů, které neleží na pokožce. U oděvů přiléhavých je chladicí efekt z vlhké textilie vnímán pokožkou uživatele a přispívá k jeho ochlazení. Se zvyšující mezerou mezi pokožkou a oděvem, tento efekt klesá. Odpařováním vlhkosti (potu) z oděvu je tedy hlavním mechanismem sušení oděvu během nošení [98].

Vliv horkého prostředí na fyziologické reakce sportovců a na jejich tělesný výkon je podrobněji popsán ve studii z roku 1999 [99]. Studie je určena především pro trenéry sportovců a obsahuje i doporučení, jakým způsobem vést trénink s ohledem na fyziologické procesy lidského organismu.

Například autoři studie [95] sledovali snižování tělesné teploty pomocí speciálního navlhčeného chladicího oděvu před samotným sportovním výkonem a během něj v horkém prostředí. Došli k závěru, že mírné odpařovací chlazení poskytuje významné termoregulační výhody během cvičení v horku. Důležitou roli hraje také načasování chladicího namočeného oděvu pro vyhodnocení různých termoregulačních odpovědí a jeho přiléhavost. Tato zjištění poskytují nový pohled na termoregulační roli teploty pokožky právě během cvičení v horku.

V posledních letech se několik výzkumných center zaměřilo na vývoj potících manekýnů [22], aby bylo možné simulovat reálné podmínky pocení, jehož intenzita se liší nejen dle míry fyzické zátěže, klimatických podmínek, ale i podle rozmístění na lidském těle [100]. Z výše uvedených prací vyplývá, že rozmístění a množství potu na lidském těle není rovnoměrné a proto i způsoby vlhčení vzorků u testování doby sušení se u jednotlivých autorů významně liší.

Například Nielsen ve své práci [96] využívá způsob vlhčení pomocí uzavření vzorku s definovaným množstvím vlhkosti do plastových obalů a jejich ponechání minimálně po dobu 8 hodin. Odlišný způsob vlhčení používali ve své práci například Crow a Osczevski [101], kteří vyzkoušely tři způsoby vlhčení. Při prvním způsobu vzorky namočily do destilované vody a poté je lehce vymáčkali pomocí papírových ubrousků, ve druhém způsobu na vzorky aplikovali 2,5 ml vody injekční stříkačkou a při třetím způsobu vkládali autoři studie rovnoměrně zavlhčené vzorky mezi dvě houby a takto je ponechaly přes noc. Ve studii Fourt a kolektiv [82] je popsán postup vlhčení ponořením vzorků do destilované vody přes noc. Ráno nechali vzorky volně odkapat do okamžiku, kdy ze vzorků odkapávala 1 či 2 kapky za minutu.

Množství aplikované vlhkosti se u jednotlivých autorů liší, například ve studiích [65, 102, 103] určuje množství aplikované vody plošná hmotnost textilie. Ve všech třech studiích odpovídá použité množství vlhkosti 30% hmotnosti vzorku v klimatizovaném stavu. V oficiálních metodikách [74, 75, 79] vychází množství aplikované vody z retenční schopnosti textilie.

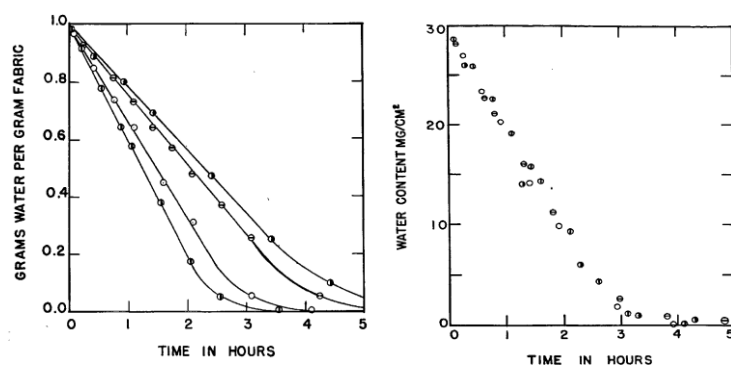
Stejný princip uvádí i studie [101, 104, 105]. Oproti tomu v normách [73, 77, 78] je přesně stanovené množství aplikované vlhkosti stejné pro všechny vzorky.

Dalším problémem při porovnání metod a způsobů testování doby sušení je určení koncového bodu. Nielsen ve své práci z roku 1992 [96] využíval metodu sušení vlhkých vzorků na tepelném manekýnu a sledoval jeho tepelné ztráty. Ve chvíli, kde tepelné ztráty dosáhly ustáleného stavu, považoval testované vzorky za suché. Autoři studie [101] oproti tomu vycházeli z přesnosti vah a konec sušení ukončili ve chvíli, kdy hmotnost sušeného vzorku dosahuje 105 % hmotnosti vzorku před zavlhčením. Odlišné způsoby v určení koncového bodu sušení jsou uvedeny i normách v kapitole 5.1. S rozdílností jednotlivých metodik a přístupů k určení doby sušení (či rychlosti) se v literatuře setkáváme po celou dobu hodnocení této problematiky, přibližně od 60 let 20. století [105].

V jedné z nejstarších prací, která se zabývá metodou sušení, z roku 1951 [82] využili autoři pomalu otáčející se kolo, na které zavěsili navlhčené bavlněné a vlněné vzorky. Tento způsob simuloval reálné podmínky při sušení textilií na šňůře. Poté byly vzorky v pravidelných intervalech odebírány a převažovány. V průběhu sušení byly dodrženy standardní klimatické podmínky. Rychlost proudění vzduchu zde není blíže specifikována, avšak odpovídá víceméně podmínkám sušení na šňůře. Z výsledků tohoto experimentu vyplývají následující poznatky. Druh použitých vláken ovlivňuje především absorpci textilií, nemá však tak významný vliv na dobu sušení. Velký vliv na sušení má i chlupatost přízí či celých plošných textilií. Mírná chlupatost textilií je schopná do určité míry zvýšit výparnou plochu a tím pádem i zvýšit rychlost sušení. Na druhou stranu ale u textilií s vysokým vlasem dochází ke zpomalení rychlosti sušení kvůli vrstvě nehybného vzduchu. Také zde svými experimenty potvrzuje, že hlavní část sušení, kdy se odstraňuje kapalná voda, probíhá s konstantní rychlostí [82].

Naměřená data z této studie poukazují na to, že celková doba sušení závisí především na množství vody, kterou textilie absorbuje. V práci jsou však hodnoceny pouze různé bavlněné či vlněné textilie, vzhledem k roku vzniku této studie zde nejsou zahrnuty například textilie z profilovaných syntetických vláken nebo jinak upravené tzv. rychleschnoucí textilie [82].

V práci lze tedy nalézt jedny z prvních sušících křivek textilií, které vychází z gravimetrické metody. Na obrázku 18 jsou zobrazeny dva způsoby vyjádření úbytku vlhkosti. V prvním z nich je vyjádřen relativní úbytek hmotnosti, který vychází ze zbylého množství vlhkosti ve vzorku vztažený na hmotnost daného vzorku v klimatizovaném stavu, v druhém případě je vyjádřen hmotnostní úbytek vlhkosti na plochu. V obou případech se jedná o sušení při volné konvekci, proto je celková doba sušení tak dlouhá.



Obr. 18 Průběh sušení u bavlněných a vlněných textiliích na čase sušení [82]

V posledních letech se sice objevuje větší množství studií, které se dobou a průběhem procesu sušení ve vztahu k termofyziologickému komfortu zabývají, avšak jsou mezi nimi značné rozdíly ve způsobu vlhčení a ve způsobu samotného průběhu testování doby sušení textilií, což kritizují i autoři studie [105].

Jednou z prvních prací, ve které se používá přístroj pro měření managementu vlhkosti, je práce autorů [106]. Odvod vlhkosti v textiliích významně ovlivňuje lidské vnímání pocitu komfortu, proto zde autoři vyzdvihují nutnost testovat management vlhkosti. V práci byla prezentována metoda a přístroj MMT k hodnocení vedení vlhkosti v textiliích, který se stal později součástí normy AATCC 195-2011 [73]. Tato nová metoda může být použita pro měření množství vlhkosti v jednom kroku ve více směrech v textiliích. Sami autoři zde popisují důležitost hodnotit šíření vlhkosti po obou stranách textilií horizontálně a také vertikálně skrz textilii. Přístroj tedy vyhodnocuje 10 zavedených indexů, které charakterizují vlastnosti vedení vlhkosti v textiliích. V této studii bylo na přístroji MMT naměřeno osm sad sportovního oblečení a výsledky ukazují významné rozdíly mezi použitými textiliemi. Zároveň jsou zde vyhodnoceny i subjektivní pocity nositelů vlhkého oděvu a dle naměřených výsledků lze říci, že se zvyšující se fyzickou aktivitou (dobou běhu) vzrůstá i důležitost hodnocení celkové schopnosti vedení vlhkosti. Nositelé jsou se zvyšující se vlhkostí v oděvu schopni lépe vnímat a subjektivně hodnotit rozdíly v pocitech lepkavosti a vlhkosti spojených s pocením nositele během fyzické aktivity. Bohužel materiály použité v této studii se od sebe liší nejen materiálovým složením, ale i plošnou hmotností, tloušťkou a vazbou, nelze tedy jednoznačně vyhodnotit, který parametr textilie významně ovlivní vlastnosti ohledně vedení vlhkosti v textiliích. Autoři studie jsou přesvědčeni, že lze subjektivní vnímání pocitu vlhkosti během pocení předpovědět pomocí přístroje MMT [106].

S tímto tvrzením si dovoluji nesouhlasit, v přístroji MMT nedochází k simulaci sušení vlhké textilie, ale pouze k hodnocení šíření vlhkosti. Problémem je zde i fakt, že přístroj nebere v potaz rozdílné šíření vlhkosti po útku a osnově, nebo v případě pletenin po sloupku či řádku. Závěry této studie kritizuje i studie [107].

Další práce, které používají pro testování přístroj MMT jsou například studie autorů Troynikova a Supurena [107, 108].

Studie Troynikova [107] vyhodnocuje na přístroji MMT pleteniny ze 100% vlny, 100% viskózy, 100% polyesteru a kombinaci vlna/viskóza a vlna/polyester pro využití jako spodní vrstvy sportovního oděvu. Autor zde kromě jiného připouští, že hodnocení na přístroji MMT nezahrnuje vliv přítomnosti vzduchových mezer mezi pokožkou a tkaninou a také vliv mezní vrstvy mezi pokožkou a textilií při skutečném nošení. Z výsledků testování managementu vlhkosti na přístroji MMT se jeví jako ideální především kombinace vláken vlna s polyesterem a vlna s viskózou, v tomto testování dosahují lepších vlastností než textilie pouze z jednoho druhu vláken [107].

Podobný výzkum zahrnuje i práce Supurena [108], která se zabývá testováním oboulícnicích pletenin v materiálových kombinacích na lícní a rubní straně: bavlna/bavlna, bavlna/polypropylen, polypropylen/bavlna a polypropylen/ polypropylen. Textilie byly hodnoceny dle výsledků parametrů vedení vlhkosti v textiliích a tepelné absorpce. Veškeré hodnoty byly naměřeny na přístroji MMT a na přístroji Alambeta. Výsledky testu ukazují, že polypropylenová vnitřní a bavlněná vnější strana pleteniny má lepší vlastnosti pro transport vlhkosti, poskytuje vysokou úroveň pohodlí a může být preferována pro letní, aktivní a sportovní oblečení. Ve studii je také porovnávána měrná tepelná jímavost v mokré a suchém stavu. V práci však nejsou zaznamenány sušící křivky, je zde hodnocena pouze rychlost šíření vlhkosti na spodní stranu textilie [108].

Avšak i přes tyto výsledky zůstávají autoři studie k testování na MMT mírně skeptičtí a zmiňují ve své práci, že se metoda testování na přístroji MMT zaměřuje pouze na transport kapalně vlhkosti v rovině textilie (částečně tedy simuluje pot přítomný na povrchu lidské pokožky), avšak nezahrnuje vlastnosti přenosu vodní páry, tepelné vlastnosti, sorpci vláken či omak, které také ovlivňují lidské vnímání komfortu. Metoda MMT je tedy vhodná jako jedna z částí hodnocení celkového termofyziologického komfortu a poskytuje pouze přibližné výsledky [107].

Jiným způsobem pohlíží na dobu sušení ve své studii Prahsarn [109], který tento faktor dává do souvislosti s dobou vysychání mikroklimatu během testování propustnosti textilií pro vodní páry a vzduchu a vychází z rozdílů relativních vlhkostí. V práci porovnává dvě metody pro hodnocení propustností a tepelných vlastností. Nezabývá se však průběhem sušení a sušícími křivkami, avšak pouze celkovou dobou sušení. Ve studii zdůrazňuje potřebu dynamických zkušebních metod s ohledem na uznávanou důležitost přechodné vlhkosti mikroklimatu při vnímání pohodlí při nošení oděvu během sportovních aktivit. Výsledky jeho studie potvrdily, že faktor ovlivňující hodnotu této vlastnosti je právě propustnost pro vzduch [109].

Potřebu zabývat se měřením doby a rychlosti sušení textilií nastiňují i práce [72, 86, 97, 98], které se zabývají měřením tepelných vlastností oděvu v mokrému stavu. V nich autor zdůrazňuje významný vliv mokrého oděvu na chladicí efekt. Vzhledem k tomu, že relativní propustnost vodní páry (relativní tok tepla odpovědný za ochlazování těla) a teplota textilie klesá v důsledku odpařování vody z povrchu tkaniny, je z hlediska tepelného komfortu v běžných klimatických podmínkách žádoucí, aby byl oděv schopen vlhkost rychleji transportovat od těla nositele.

Výsledky studií [97, 98] potvrzují, že pokud je mokrá oděv přímo na pokožce, zvyšuje se významně chladicí efekt. Pokud je mezi oděvem a pokožkou mezera, je tento chladicí účinek nižší.

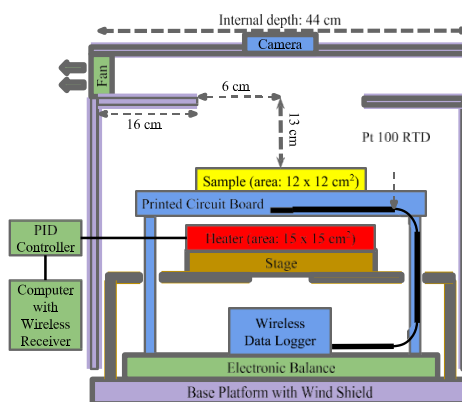
Odlišné metody hodnocení doby sušení zmiňuje studie [105], která vyhodnocuje dvě metody doby sušení. První metoda využívá k testování zakrytované laboratorní váhy, na které autorka umístila navlhčený vzorek a sledovala úbytek hmotnosti. Chybí zde nastavení rychlosti proudu vzduchu, měření je proto značně zdlouhavé. Váha vzorku se zaznamenává v pětiminutových intervalech. Vyhodnocení doby sušení probíhá dvěma způsoby. První způsob vychází z rozdílu mezi hmotností klimatizovaného vzorku a vzorku sušeného. Druhý způsob porovnává rozdíl mezi hmotností aktuální u sušeného vzorku a hmotností předchozí. U prvního způsobu se zaznamenává čas sušení při dosažení rozdílů hmotností: 2 %, 1 %, 0,5 % a u druhého způsobu při dosažení rozdílů po sobě jdoucích hodnot hmotností: 0,5 %, 0,2 %, 0,1 %. Autorka zde zmiňuje, že právě volba koncového bodu je pro hodnocení doby sušení velmi důležitá. Dle výsledků studie je vhodnější první způsob, který porovnává hmotnost klimatizovaného vzorku a vzorku sušeného. Dále je v práci doporučeno, aby rozdíl nebyl větší než 2 %. Práce však neobsahuje sušící křivky, ale opět pouze celkovou dobu sušení.

Druhá metoda spočívá v umístění vlhčeného vzorku lící stranou nahoru v pravém úhlu k proudění vzduchu v celé ploše (rychlost proudění je nastavena na:  $1 \pm 0,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) na vyhřívanou desku zařízení, které se používá pro určení tepelného odporu dle normy ISO 11092 [68]. Stabilní stav a konec měření je definován pro chvíli, kdy teplota dosáhne konstantní hodnoty  $35 \pm 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a teplota destičky dále nekolísá o více než  $\pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$  během čtyř půlhodinových intervalů [105].

Jednoduchý způsob hodnocení doby sušení se objevuje také v práci autorů Varga a kol. [110], kde byly testovány bavlněné a tencelové tkaniny po ošetření pryskyřicí při různých teplotách. Na ošetřených a neošetřených textiliích byly změřeny tyto vlastnosti: sorpce kapaliny a vodní páry, rychlost sušení a absorpce tepla. Pro záznam sušících křivek je zde využit jednoduchý způsob. Vzorek textilie o rozměru 5 x 15 cm se umístí na citlivé váhy připojené k počítači. Pomocí injekční stříkačky se aplikuje množství 500 mg vodného roztoku barviva do středu textilie. Během sušení je vzorek pravidelně vážen. Měření probíhalo vždy 2 hodiny, hmotnost vzorku byla zaznamenávána v minutových intervalech. Pro každý vzorek byla provedena dvě měření a byla vypočítána průměrná sušící křivka. Měření je však díky absenci ofukování velmi zdlouhavé [110].

V roce 2018 se objevil nový přístroj na měření rychlosti sušení a záznam sušících křivek v práci [111]. Jedná se o zařízení, které využívá tzv. nekontaktního způsobu vytápění vzorku, který je umístěn těsně nad vyhřívací systém na tenkou platformu se zabudovaným teplotním čidlem. Samotný vyhřívaný systém není v kontaktu s váhami ani měřeným vzorkem a platformou, na které leží. Díky tomuto řešení není přesnost vah ovlivněna ostatními kabely, které jsou nutné pro napájení ohřívacího systému. Platforma se vzorkem je postavena přímo na analytické váhy. Rychlost vzduchu přímo nad vzorkem je nižší než hodnota  $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

K zajištění stabilního prostředí a odvodu vlhkého vzduchu zde slouží ventilační systém. Nad celým systémem je umístěna kamera, která zároveň zaznamenává i oblast šíření vlhkosti. Schéma přístroje zobrazuje obrázek 18.



Obr. 19 Schéma přístroje pro měření doby sušení

Hlavními parametry, které lze danou metodou určit jsou: rychlost sušení při konstantní teplotě a velikost plochy vodní skvrny na vzorku 60 sekund po aplikaci kapaliny. Rychlost sušení je zde počítána pomocí změny hmotnosti v závislosti na čase v lineární části sušících křivek. Kromě výše zmíněného vyhodnocuje práce i závislost šíření vlhkosti vůči rychlosti sušení. Křivky sušení zde prezentují proces nejen sušení, ale také šíření vlhkosti, hmotnost je tedy zaznamenávána i v době, kdy dochází k šíření a absorpci vlhkosti po aplikaci 0,2 ml tekutiny. Ta je aplikovaná pipetou pod vzorek. První ohyb na křivce je tedy způsoben časem potřebným ke stabilizaci smáčené oblasti, druhý ohyb pak na konci sušící křivky, kdy dochází ke zpomalení sušícího procesu. Pro porovnání různých textilií je vybrána pouze lineární část sušící křivky. Sklon je počítán pomocí lineární regrese.

Přístup hodnocení rychlosti sušení z této studie [111] je tedy velmi podobný zde vyvinuté nové metodě, liší se však teplotou měření a rychlosti proudění nad měřeným vzorkem. Podobný způsob sledování a vyhodnocení šíření a absorpce vlhkosti simulující reálné pocení pomocí termokamery využívali o pár let dříve autoři studie [112], v této studii však není řešena doba sušení ale pouze šíření vlhkosti.

Oproti tomu ve studii [113] z roku 2016 se kromě jiného objevuje i využití infračervené kamery pro měření celkové doby sušení, která vychází ze zobrazené zavlhčené plochy. Za dobu sušení zde byl považován čas až od chvíle, kdy je ukončen proces smáčení do okamžiku, kdy plocha zavlhčené oblasti klesne pod 0,5 cm<sup>2</sup>.

## EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část je rozdělena na tři hlavní části: konstrukce přístroje včetně potřebných výpočtů, analýza sušících křivek a vliv obsahu vlhkosti na vnímání termofyziologického komfortu. Po zhodnocení poznatků z předchozích studií ostatních autorů [111, 113, 105, 112] a zhodnocení jednotlivých norem či metod [73, 74, 75, 76, 77, 78, 79] byl vytvořen nový prototyp přístroje, který odstranil nedostatky předchozích metod. Na novém prototypu přístroje lze zaznamenávat sušení textilie pomocí vážení vzorků v pravidelných časových intervalech, měnit rychlost proudění a především udržet izotermní podmínky měření. Z tohoto důvodu hlavní cíl experimentální části zahrnuje vývoj a realizaci prototypu přístroje včetně nutných výpočtů k zajištění izotermních podmínek měření. Přístroj umožňuje měření za standardních i alternativních klimatických podmínek.

Pro záznam sušících křivek byl v této práci zvolen gravimetrický způsob, který nejlépe reflektuje skutečné množství vlhkosti v textilií. Pro ověření opakovatelnosti měření byla vybrána bavlněná textilie plátňové vazby. Následně po vyladění konstrukce přístroje byly provedeny další experimenty pomocí souboru textilií (pletenin) s podobnými konstrukčními parametry, které se standardně používají pro výrobu spodního prádla. Naměřená data jsou vyhodnocena v kapitole sedmé, nazvané jako analýza sušících křivek, která zahrnuje tyto body:

- porovnání metod vlhčení vzorků A a B,
- vyhodnocení vlivu rychlosti proudění vzduchu nad měřenými vzorky,
- porovnání izotermních a neizotermních podmínek vzhledem k rychlosti sušení,
- porovnání výsledků z nového přístroje s naměřenými daty z přístroje MMT.

V poslední osmé kapitole je vyhodnocen vliv obsahu přidané vlhkosti v textiliích na termofyziologický komfort včetně subjektivního hodnocení suchosti či vlhkosti textilie.



## 6 Návrh a realizace prototypu přístroje

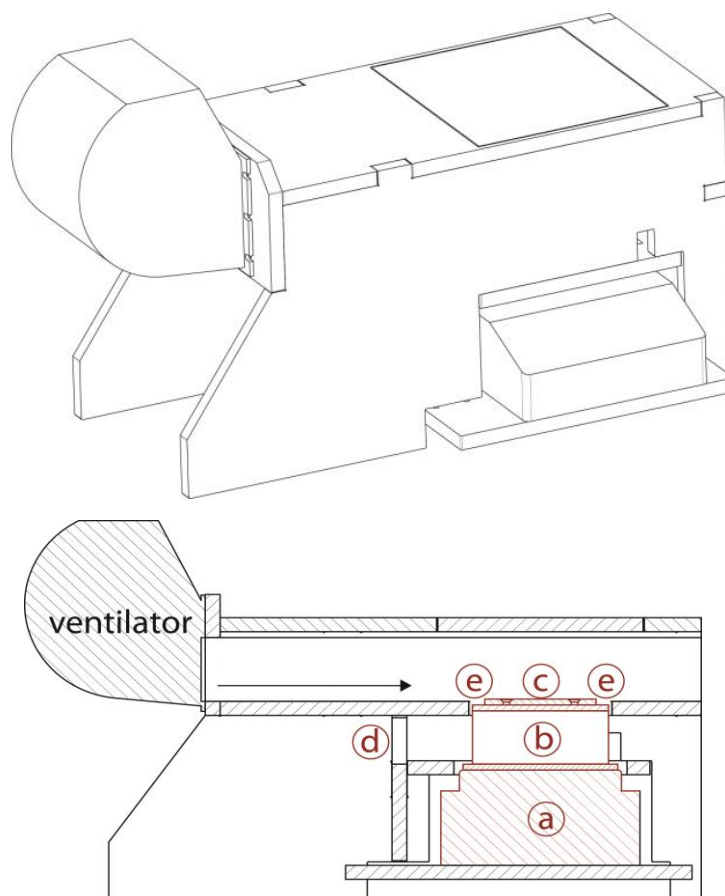
Z výsledků předchozích experimentů dle dostupných metodik [68, 73, 78, 80] popsanych v diplomových pracích [114, 115, 116] a odborných článcích (například [83, 89, 105]) vyplývá, že rozhodujícím faktorem pro rychlost a průběh sušení je kromě teploty a vlhkosti také rychlost proudění. Tento fakt vyzdvihují ve své studii především autoři Chau a kol. [111], kteří se naopak snažili rychlost proudění z důvodů náročné regulace rychlostního profilu zcela minimalizovat. Ostatní dostupné metodiky a studie často vliv proudění zcela opomíjejí [79] nebo měří na zakrytovaných vahách [78, 105, 110], u kterých není vyřešen odvod vlhkosti pryč z prostoru nad vzorkem. Někteří autoři se rychlostí proudění sice zabývají [82], avšak neřeší již režim proudění a s ním související i stupeň turbulence. Proto je dílčím cílem této práce i návrh a realizace prototypu přístroje pro měření průběhu sušení textilií za přesně definovaných podmínek rychlosti proudění vzduchu nad vzorkem a také je zde využit vyhřívací element pro zajištění izotermních podmínek měření. Výslednému návrhu předcházely experimenty na upraveném přístroji Permetest pro měření paropropustnosti. Výsledky z tohoto experimentu shrnují články [117, 118].

Vytvořený první prototyp nového přístroje umožňuje měření s regulací rychlosti proudění od 1 do 5 m·s<sup>-1</sup> přímo nad měřenou textilií. Také obsahuje usměrňovací část pro dosažení ustáleného proudění. V původním návrhu prototypu figurovala i vyhřívaná deska dle normy [68, 77] jako tomu je například ve studii [111]. Od té bylo nakonec ustoupeno vzhledem k finanční náročnosti pro perfektní regulaci její teploty a technického řešení pro zakomponování na váhací element, aniž by docházelo k nepřesnosti vážení vlivem přírodních kabelů k vyhřívané destičce. Místo destičky bylo zvoleno jednodušší řešení, tzv. hliníkové “chladičí” žebro, které má vysokou tepelnou vodivost a je schopné udržet po celou dobu konstantní teplotu svého povrchu i přes chlazení mokrým vzorkem. K dokonalému ohřevu žebra slouží přidané ventilátory, které ho ve spodní části ofukují. Tím je zajištěna téměř konstantní teplota okolí a destičky během celého měření. Veškeré výpočty jsou provedeny v kapitole 6.2.

První prototyp přístroje popisují odborné články [119, 120] a přístroj je zobrazen na obrázku 20 a 21. Prototyp přístroje se skládá ze dvou hlavních částí. Z tzv. kanálu, který obsahuje ventilátor a usměrňující část pro proudění. Zde byl využit nápad pana prof. Wienera s trubičkami, jež tvoří souvislý blok usměrňující díky svým malým průměrům tok vzduchu tak, aby v měřicí části umístěné těsně za ním docházelo k rovnoměrnému profilu proudění. Ventilátor umožňuje nastavit různé rychlosti proudění, které ofukuje testovaný materiál.

Druhou část tvoří měřicí jednotka, na které je horizontálně umístěn testovaný materiál. Měřicí jednotka (viz obrázek 20) se skládá z analytických vah (a), hliníkového žebra (b) a destičky (c). Hliníkové žebro s připevněnou destičkou je ofukováno dalšími ventilátory, které zajišťují izotermní podmínky sušení. Pomocí upínacího rámečku (e) je na destičku připevněn měřicí vzorek.

Těsně před hliníkovým žebrem (d) jsou umístěné přídavné ventilátory, které pomáhají žebro během měření udržovat na konstantní teplotě. Testovaný vzorek zasahuje celou vlhčenou plochou do kanálu.



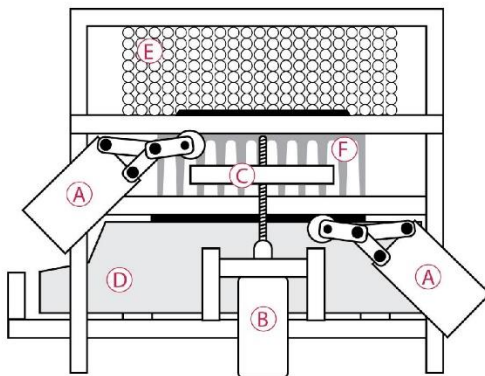
Obr. 20 První prototyp přístroje – schéma celkového vzhledu a řez



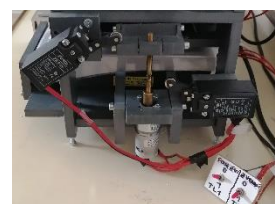
Obr. 21 Fotografie 1. prototypu přístroje

Později byl první prototyp přístroje rozšířen o zvedací element s časovými čidly a PLC (systémově řídicí jednotka) viz schéma a fotografie na obrázcích 22 a 23, aby bylo docíleno maximální možné přesnosti měření, jak bude popsáno podrobněji v následujících kapitolách.

A - koncová čidla, B - zvedací mechanismus,  
C - rám zvedacího mechanismu, který zvedá měřící člen,  
D - analytické váhy, E - usměrňovač proudění,  
F - hliníkové žebro



Obr. 22 Schéma 2. prototypu přístroje – přidání zvedacího elementu – boční pohled



Obr. 23 Fotografie 2. prototypu přístroje

## 6.1 Popis přístroje

V této kapitole jsou popsány nejdůležitější součásti přístroje.

### *Ventilátor*

Hlavním parametrem pro výběr ventilátoru bylo zvolení dostatečného průtočného množství vzduchu a také jeho rozměr. S ohledem na rychlostní profil a plochu potřebnou k sušení vzorku byl vybrán radiální ventilátor. Ventilátor lze regulovat pomocí externího napájení. Ustáleného proudění bylo docíleno tak, že se využil usměrňovač proudění vytvořený z úzkých trubiček. V současnosti je rozpracovaná i varianta, ve které by byl proud vzduchu nasáván a tudíž by se docílilo ještě lepšího rychlostního profilu i pro vyšší rychlosti proudění.

### *Chladicí element*

Pro výběr chladicího elementu byla zásadní především velikost a hmotnost kvůli maximálnímu zatížení vah. Při výběru byly zohledněny nabízené hotové varianty od různých výrobců, bohužel nebylo technicky možné si jej nechat odlít na míru. Na chladicí element byla pomocí teplovodivého lepidla připevněna měřicí destička, na kterou se upevňuje měřicí vzorek pomocí jednoduchého rámečku nebo bodově v rozích pomocí oboustranné lepicí pásky.

### *Teplotní čidlo*

Pro měření teploty chladicího elementu byl vytvořen v chladiči otvor pro umístění teplotního čidla PT100. Teplotní čidlo je umístěno cca 1 mm pod povrchem, na který se umísťuje měřený vzorek. Pro zobrazení teploty byla použita vhodná zobrazovací technika s přesností  $\pm 0,2$  °C.

### *Váhy*

Původní návrh prototypu obsahoval nosníkový tenzometr a vhodnou elektroniku pro měření. Tato varianta však byla finančně i časově náročná bez jistého výsledku, proto byly pro první experimenty využity starší váhy z laboratoře komfortu. Během měření však došlo k zjištění chyby, která u vah vznikala dlouhodobým zatížením a narůstala během měření v čase. Bylo tedy třeba vyřešit technický problém s váhami a po jejich servisní prohlídce zakoupit váhy nové. Váhy jsou během měření propojené s počítačem a v průběhu měření se zaznamenává změna hmotnosti v daných časových intervalech.

### *Konstrukce rámu přístroje*

Vzhledem k technickým požadavkům byl pro rám přístroje zvolen materiál, který se dá jednoduše obrábět a má dostatečnou pevnost.

S ohledem na požadavky při sušení byly vybrány desky z neměkčeného polyvinylchloridu (PVC-U), které jsou díky své vysoké pevnosti, nenavlhavosti, tuhosti a snadnému svařování i lepení vhodným materiálem pro stavbu technologických zařízení především do chemického průmyslu. Rám přístroje odpovídá rozměrům zvolených komponentů a respektuje nutnost umístit váhy do vodorovné pozice pro správné měření hmotnosti. Pro vkládání vzorku na měřicí místo je v horní části větrného tunelu vytvořeno víko pro snadný přístup.

### ***Časová čidla a zvedací element***

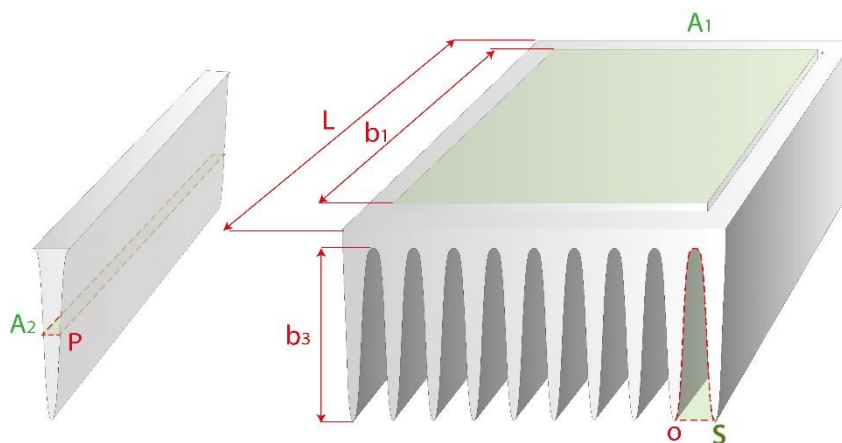
Z prvních experimentů vyplynula potřeba vypínat ventilátor v určitých časových intervalech kvůli přesnosti vážení, proto byl přístroj doplněn o časové relé. Při zjištění chyby hmotnosti vlivem proudění ventilátoru na tenzometr váhy byl dodatečně nainstalován zvedací element, díky kterému bylo možné v průběhu měření váhy odlehčit a tím pádem eliminovat odchylku vznikající prouděním.

### ***Programovatelný logický automat (dále jen PLC jednotka)***

Pro zajištění opakovatelných podmínek při měření bylo do přístroje zabudované automatické řízení měření pomocí PLC jednotky. PLC jednotka zapíná a vypíná ventilátor při odečítání hmotnosti. Zároveň je pomocí PLC jednotky řízeno zvedání a pokládání celého hliníkového bloku z důvodu přesnosti měření.

## **6.2 Výpočet přestupu tepla**

Pro ověření izotermních podmínek bylo nutné provést následující výpočty. V tabulce 6 jsou uvedeny parametry chladicího bloku, tzv. hliníkového žebra (viz obrázek 24), na kterém je umístěn vzorek. Výpočty a tabulkové hodnoty fyzikálních veličin jsou platné pro teplotu  $20 \pm 1$  °C a relativní vlhkost vzduchu  $65 \pm 4$  %, což odpovídá standardním podmínkám, při kterých probíhá většina testování termofyziologických vlastností textilií v klimatizované laboratoři [121].



Obr. 24 Chladící element – hliníkové žebro

Tab. 6 Konstrukční parametry chladičího žebra

celková délka chladiče - $L$	0,109 m
celková šíře chladiče	0,1 m
celková výška chladiče	0,055 m
délka destičky pro umístění vzorku - $b_1$	0,091 m
šíře destičky pro umístění vzorku	0,08 m
výška destičky pro umístění vzorku	0,005 m
výška žebra - $b_3$	0,045 m
obvod mezery mezi žebry - $o$	0,099 m
plocha průřezu mezi žebry - $S$	0,00028 m <sup>2</sup>
plocha vzorku - $A_1$	0,00728 m <sup>2</sup>
střední hodnota průřezu žebra - $A_2$	0,00044 m <sup>2</sup>
celková hodnota průřezu všech žeber u paty žeber - $A_3$	0,006322 m <sup>2</sup>
obvod žebra - $P$	0,226 m
celková plocha bočních stran	0,011169 m <sup>2</sup>
celková plocha přední a zadní strany s výřezy žeber	0,0065 m <sup>2</sup>

### 6.2.1 Chladičí efekt vznikající odparem vlhkosti při volné hladině

Během měření vlhkého vzorku dochází k odparu vlhkosti, který způsobuje významný chladičí efekt viz rovnice (72) a závisí kromě jiného i na teplotě [86].

Celý proces sušení na novém přístroji je urychlen nucenou konvekcí, kterou zajišťuje hlavní ventilátor. Pro účely výpočtu je rychlost ofukování vzorku nastavena na hodnotu  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a je změřena pomocí anemomentru. Výparné teplo má při teplotě  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  hodnotu  $2453,4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  [3, 11]. Měrná plynová konstanta pro vodní páru  $r$  je  $461,5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  [3]. Rozdíl parciálních tlaků vodní páry při  $RH = 65 \%$  vzduchu vychází  $817 \text{ Pa}$ .

Pro výpočet rovnice (72) je však nutné nejprve spočítat součinitel přenosu hmoty  $\beta_C$  vztažený k rozdílu koncentrací podle rovnice (73) [3]. Pro výpočet celkového tepelného toku odparem je třeba součinitel přenosu hmoty  $\beta_C$  přepočítat pomocí měrné plynové konstanty a termodynamické teploty tak, abychom získali součinitel přenosu hmoty vztažený k rozdílu parciálních tlaků  $\beta_p$  podle rovnice (72) [2]. Sherwoodovo číslo ve své podstatě vyjadřuje Nusseltovo difuzní kritérium [4] viz rovnice (74). Koeficient difuzivity vodní páry ve vzduchu lze spočítat ze vztahu (75) a dosahuje pro atmosférický tlak  $1,01325 \text{ MPa}$  a teplotu  $293,15 \text{ K}$  přibližně hodnoty  $2,4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  [5]. Za charakteristický rozměr tělesa v tomto případě je považována délka destičky ve směru proudění.

Výpočet Reynoldsova čísla  $Re$ , které je také bezrozměrné, představuje rovnice (76) [2]. Toto číslo se používá u nucené konvekce a vychází z porovnání sil setrvačných a třecích. Dle hodnoty Reynoldsova čísla je určen typ proudění a následně tvar kriteriální rovnice [4]. Kinematická viskozita vzduchu dosahuje hodnoty  $1,532 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  [122].

$$\dot{Q}_1 = \beta_p \cdot \Delta p_p \cdot A_1 \cdot l_v = \frac{\beta_c}{r \cdot T} \cdot \Delta p_p \cdot A_1 \cdot l_v \quad (72)$$

$$\beta_c = \frac{Sh \cdot D_v}{b_1} \quad (73)$$

$$Sh = 0,664 \cdot Re^{0,5} \cdot Sc^{0,33} = 43,2 \quad (74)$$

$$D_v = 1,87 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{T^{2,072}}{p} \quad \text{pro } 282 \text{ K} \leq T \leq 450 \text{ K} \quad (75)$$

$$Re = \frac{v \cdot b_1}{\eta} \quad (76)$$

V tomto případě dosahuje Reynoldsovo číslo hodnoty 5939,9. Ostrá naběžná hrana však může způsobit u vyšších rychlostí lokální turbulenci (tohoto efektu si byli vědomi i autoři normy ISO 11092 [68]), kteří připouští jistý stupeň turbulence. Schmidtovo číslo  $Sc$  udává poměr mezi kinematickou viskozitou proudící tekutiny  $\nu$  a difuzním koeficientem složky  $D_v$ . Pro vzduch a vodní páru lze jeho hodnotu nalézt také v tabulkách a dosahuje hodnoty 0,6 [10]. Doplněním obou bezrozměrných čísel  $Re$  a  $Sc$  do rovnice (74) [5] získáváme hodnotu Sherwoodova čísla  $Sh$ , která vychází 43,2. V literatuře lze nalézt více tvarů rovnice pro výpočet tohoto čísla [3, 9, 10], avšak rozdíly ve výsledcích jsou minimální a pro tento případ zanedbatelné.

Dosažením  $Sh$  do rovnice (72) dostaneme součinitel přenosu hmoty  $\beta_c$  viz výpočet (77), který vychází  $0,0113 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Rovnice (72) počítá tepelný tok odvedený odparem z celého povrchu namočené textilie, kterou pokrývá souvislá vrstva kapaliny. Jeho hodnota je 1,22 W, viz rovnice (78).

$$\beta_c = \frac{Sh \cdot D_v}{b_1} = \frac{43,2 \cdot 2,4 \cdot 10^{-5}}{0,091} = 0,0113 \quad (77)$$

$$\dot{Q}_1 = \frac{0,0113}{461,5 \cdot 293,15} \cdot 817 \cdot 0,00728 \cdot 2,45 \cdot 10^6 = 1,22 \quad (78)$$

## 6.2.2 Výpočet koeficientu přestupu tepla $\alpha$

Ve spodní části chladiče (hliníkového žebra) vzniká nucená konvekce pomocí tří přídavných ventilátorů, která podporuje izotermní podmínky měření. Rovnice (79) tedy zahrnuje výpočet koeficientu přestupu tepla konvekcí  $\alpha$ . Všechna žebra jsou ofukována přídavnými ventilátory, které významně ovlivňují rozdíl teplot  $\Delta T$  [K]. Cílem je, aby byl rozdíl teplot minimální.

Pro účely výpočtu je uvažována rychlost  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , tuto rychlost však lze zvýšit v případě vyšší rychlosti hlavního ventilátoru. Obdobně jako součinitel přenosu hmoty je i koeficient přenosu tepla prouděním spočítán pomocí tzv. podobnostních čísel a kritériální rovnice. Prandtlovo číslo lze spočítat dle vztahu (80), kde  $\nu$  označuje kinematickou viskozitu vzduchu,  $\rho$  hustotu vzduchu, veličina  $c_p$  měrnou tepelnou kapacitu ( $1006 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) a veličina  $\lambda_1$  součinitel tepelné vodivosti vzduchu ( $0,026 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ). Hodnota Prandtlova čísla v tomto případě vychází 0,71, tento výsledek odpovídá i hodnotám uvedených v publikaci [5].

Veličina  $b_2$  označuje tzv. charakteristický průměr pro nekruhový kanál, v tomto případě je nutné jej spočítat viz rovnice (81). Je zde aplikován výpočet dle [2] pro trubky nekruhového tvaru a jeho hodnota je 0,0113 m. Hodnotu Reynoldsova čísla  $Re$  počítá rovnice (82). Tato hodnota potvrzuje, že se jedná o laminární proudění [3]. Lze tedy využít zjednodušené kritériální rovnice (83) pro výpočet Nusseltova kritéria, které vychází 7,59 [4]. Složitější tvar kritériální rovnice uvádí ve své práci [2] Barták, avšak po jejím přepočítání vychází podobná hodnota, přesněji 7,41. Kromě jiného je zde poměr mezi charakteristickým průměrem a jeho délkou. Dosazením Nusseltova čísla viz rovnice (84) se získá hodnota koeficientu přestupu tepla  $17,46 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ .

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_1}{b_2} \quad (79)$$

$$Pr = \frac{\nu \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda_1} = 0,71 \quad (80)$$

$$b_2 = \frac{4 \cdot S}{o} = \frac{4 \cdot 0,00028}{0,099} = 0,0113 \quad (81)$$

$$Re = \frac{\nu \cdot b_2}{\nu} = \frac{2 \cdot 0,0113}{0,00001532} = 1475 \quad (82)$$

$$Nu = 1,615 \cdot \left( Re \cdot Pr \cdot \frac{b_2}{L} \right)^{0,33} \quad (83)$$

$$= 1,615 \cdot (1475 \cdot 0,71 \cdot 0,104)^{0,33} = 7,59$$



$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_1}{b_2} = \frac{7,59 \cdot 0,026}{0,0113} = 17,46 \quad (84)$$

### 6.2.3 Přestup tepla žebry chladiče

Pro výpočet celkového tepelného toku viz rovnice (85) [5], který zahrnuje přestup tepla konvekcí z okolního vzduchu a vedení tepla skrz hliníková žebra chladiče, je nutné nejprve určit tzv. parametr  $m$  dle rovnice (86) uvedené v [5]. Tento parametr ve svém výpočtu zahrnuje koeficient přestupu tepla  $\alpha$  a součinitel tepelné vodivosti hliníkového žebra  $\lambda_2$ , který činí  $211 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  [5]. Jednotlivé hodnoty veličin jsou uvedeny v tabulce 6. Po dosazení jednotlivých veličin do rovnice (87) dostáváme hodnotu  $2,48 \text{ W} \cdot \Delta T$ .

$$\dot{Q}_2 = m \cdot b_3 \cdot \tanh(m \cdot b_3) \cdot \frac{\lambda_2}{b_3} \cdot A_3 \cdot \Delta T \quad (85)$$

$$m = \sqrt{\frac{\alpha \cdot P}{\lambda_2 \cdot A_2}} = 6,52 \quad (86)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_2 &= (m \cdot b_3 \cdot \tanh(m \cdot b_3)) \cdot \frac{\lambda_2}{b_3} \cdot A_3 \cdot \Delta T \\ &= 0,2934 \cdot \tanh(0,2934) \cdot \frac{211}{0,045} \cdot 0,006322 \cdot \Delta T = 2,48 \cdot \Delta T \end{aligned} \quad (87)$$

### 6.2.4 Výpočet rozdílu teplot

V předchozích kapitolách byly vyjádřeny jednotlivé tepelné toky, ze kterých je nyní nutné spočítat rozdíl teplot. V celkovém výpočtu je zanedbaný vliv záření, které je díky lesklému vnitřnímu povrchu měřicího kanálu minimální. Rovnice (88) porovnává jednotlivé toky tepla, a to tepelný tok odparem na jedné straně a na straně druhé tepelný tok konvekcí a vedením skrz hliníkové žebro. V tomto případě platí okrajová podmínky 3. druhu, tzv. Robinovu podmínka, která předpokládá rovnost hustoty toku tepla konvekcí mezi povrchem a tekutinou a hustotu tepelného toku vedením ve stěně v blízkosti daného povrchu, jak je vysvětleno v kapitole 2.1.3.1. Následující rovnice (89) počítá rozdíl teplot.

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 \quad (88)$$

$$1,22 = 2,48 \cdot \Delta T \rightarrow \Delta T = \frac{1,22}{2,48} = 0,49 \quad (89)$$

Vzhledem k tomu, že vychází rozdíl 0,49 K (°C), lze podmínky měření považovat téměř za izotermní. Je nutné brát v potaz i to, že veškeré výpočty jsou provedeny pro maximální výparnou plochu, která je, jak potvrdil následující experiment, u textilních vzorků téměř vždy menší. Pokud by se ještě zvýšila rychlost u spodních ventilátorů, nebo změnil tvar chladicího žebra (blok s více žebry), bude teplotní rozdíl zcela zanedbatelný. Také je nutné brát v potaz zjednodušení kvůli nehomogenosti a nerovnoměrnému povrchu.

Dodržení přesných klimatických podmínek měření má při sušení textilií zásadní vliv na přesnost výsledků. Je tedy nutné sledovat po celou dobu měření především teplotu a relativní vlhkost vzduchu v laboratoři. I přes odchylky, které připouští norma [121], je vhodné zamezit kolísání teploty i relativní vlhkosti vzduchu. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno po ověření opakovatelnosti měření při standardních klimatických podmínkách k úpravě klimatických podmínek v laboratoři dle podmínek definovaných jako alternativní zkušební prostředí. Alternativní zkušební prostředí umožňuje měřit při relativní vlhkosti vzduchu  $50 \pm 4\%$  a teplotě  $23 \pm 2$  °C [121]. Toto prostředí i lépe odpovídá běžným klimatickým podmínkám v interiérech v naší oblasti. Klimatizování laboratoře není tak náročné jako v případě standardních podmínek a lze tedy zajistit přesnější výsledky.

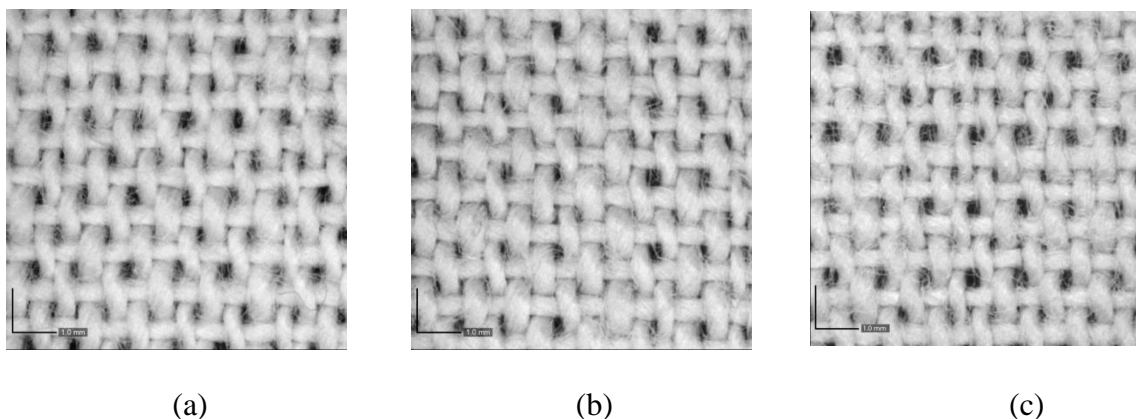
V případě alternativních zkušebních klimatických podmínek se díky většímu rozdílu parciálních tlaků teplotní rozdíl mírně zvýší, přesněji o 0,3 °C. Výpočet teplotního rozdílu byl následně ověřen i pomocí teplotního čidla, které bylo umístěno těsně pod povrch měřicí destičky. Záznam teplot během sušení vlhké textilie (v tomto případě vzorek P-VI) je uveden v příloze 1. Vliv podmínek měření (izotermní a neizotermní) na tvar sušících křivek a rychlost sušení je vyhodnocen v kapitole 7.4.

### 6.3 Návrh konstrukčních úprav prototypu přístroje

Pro otestování prvního prototypu přístroje byly vybrány materiály (100% bavlna, 50% bavlna/ 50% polypropylén a 100% polypropylén) v plátňové vazbě a bez chemických úprav. Odběr vzorků probíhal v souladu s normou ČSN EN 12751 [123]. Specifikace jednotlivých materiálů je v tabulce 7. Jemnost přízí byla stanovena výrobcem, plošná hmotnost byla změřena dle normy ČSN EN 12127 [124], tloušťka textilií byla změřena v souladu s normou ČSN EN ISO 5084 [125]. Ekvivalentní průměr příze  $d_e$  (tab. 7) je spočítán dle rovnice (90), kde  $T_p$  označuje jemnost příze,  $\rho$  označuje hustotu klimatizovaných vláken a  $\mu$  zaplnění příze. Hodnota zaplnění příze se pohybuje v rozmezí (0-1) [126]. Určit přesnou hodnotu zaplnění je však velmi složité kvůli nerovnoměrné struktuře příze, její chlupatosti atd., jak ve své zprávě uvádí například Křemenáková a kol. [127]. Proto byl průměr příze ověřen ještě pomocí obrazové analýzy.

$$d_e = \sqrt{\frac{4T_p}{(\pi \cdot \mu \cdot \rho)}} \quad (90)$$

Porozita textilie byla stanovena z podílů objemů viz studie [128]. Hustota klimatizovaných vláken (měrná hmotnost vláken) vychází z hodnot uvedených v [50]. Snímky na obrázku 25 byly pořízeny na digitálním mikroskopu Dino-Lite.



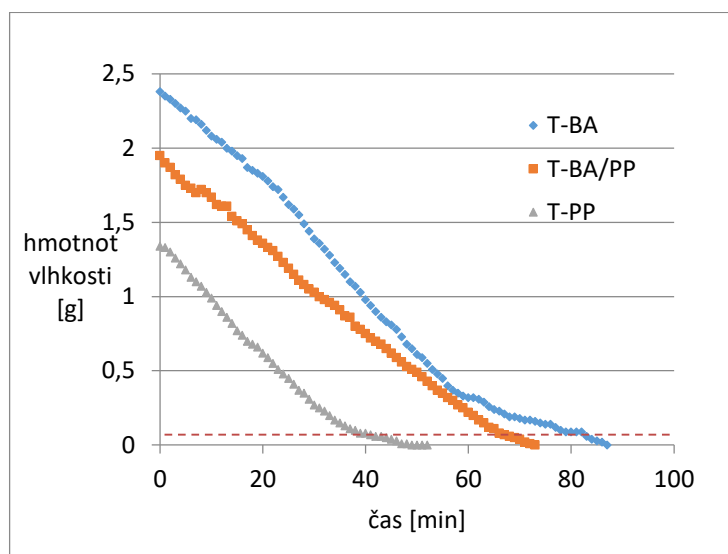
Obr. 25 (a) T-BA, (b) T-BA/PP, (c) T-PP

Tab. 7 Specifikace vzorků

označení vzorku		T-BA	T-BA/PP	T-PP
materiálové složení vzorku		100% bavlna	50% bavlna a 50% polypropylén	100% polypropylén
plošná hmotnost	[g·m <sup>-2</sup> ]	165	165	165
tloušťka textilie	[mm]	0,43	0,52	0,61
měrná hmotnost klimatizovaných vláken [50]	[kg·m <sup>-3</sup> ]	1530	1255	980
dostava osnovy	[10 cm <sup>-1</sup> ]	200	200	200
dostava útku	[10 cm <sup>-1</sup> ]	140	140	140
jemnost přízí	[tex]	45	45	45
průměr příze	[mm]	0,27	0,3	0,34
porozita	[%]	50	49	45

První experimenty na novém prototypu přístroje probíhaly při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti vzduchu 65 %. Z každého materiálu byl vystřižen vzorek o velikosti 8 x 9,1 cm. Jednotlivé vzorky byly klimatizovány při laboratorních podmínkách normálního ovzduší dle normy ČSN EN ISO 139 [121] 24 hodin a následně zváženy na analytických vahách přístroje při zapnutém proudění. Rychlost proudění byla nastavena na rychlost 3 m·s<sup>-1</sup>. Následně byly všechny vzorky ponořeny do vody o teplotě 20 °C po dobu nejméně 3 hodin. Každý vzorek byl po vyndání z vodní lázně 5 minut nechán k volnému okapání na své podložce, umístěn do přístroje na měřicí destičku a zvážen.

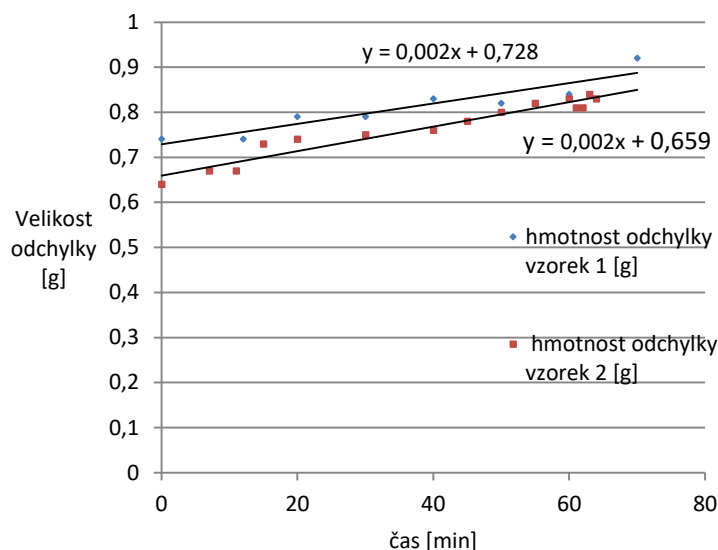
Samotné měření bylo v této studii zahájeno po umístění vzorku na rám přístroje, jeho zvážení a zapnutí ventilátoru. Každou minutu byla ručně zapisována hmotnost vzorku, což však bylo značně nepraktické a zdlouhavé. Průběh sušení všech tří vzorků je uveden v grafu na obrázku 26.



Obr. 26 Sušící křivky zatížené chybou přístroje

Bohužel po sundání vzorků z vah zůstávala na displeji významná hmotnostní odchylka, která ovlivnila průběh a dobu měření. Bylo patrné, že s narůstající dobou měření dochází k výrazné chybě, kterou je třeba odstranit. Z tohoto důvodu zde nejsou tato data podrobněji vyhodnocena a ani zde není uvedeno opakované měření pro každý vzorek.

První možnost nabízela vypínání ventilátoru v určitém intervalu vždy na dobu nutnou ke stabilizaci vah. Po dobu vypnutí ventilátoru byla naměřena hmotnost vzorku a následně porovnána s hodnotou, která byly naměřena po opětovném zapnutí ventilátoru. Po několika experimentech však bylo zřejmé, že se odchylka mezi zapnutým a vypnutým ventilátorem zvyšuje v čase, jak je patrné z grafu na obrázku 27, kde byl ventilátor vypínán ručně. Experiment byl proto po 70 minutách ukončen.



Obr. 27 Odchylka hmotnosti mezi vypnutým a zapnutým ventilátorem pro T-BA a T-BA/PO

V této fázi vývoje přístroje byl navíc záznam měření značně zdlouhavý a náročný na obsluhu. Bylo tedy nutné propojit váhy s počítačem a naměřené hodnoty dále zpracovávat společně s časovým údajem pomocí programu Microsoft Excell.

Další úprava přístroje umožnila automatické vypínání ventilátoru pomocí časového spínače v pravidelných časových intervalech (3 minuty). Následné hodnoty hmotnosti byly zaznamenávány pouze v čase, kdy byl ventilátor vypnutý. Kvůli tomu byla částečně eliminována chyba vznikající vlivem proudění z ventilátoru. Bohužel se ale objevil problém související s dlouhodobým zatížením vah.

Při zapnutém proudění docházelo k částečnému vychylování tenzometru ze své osy a ten se nebyl schopen i přes pravidelné vypínání srovnat zpět. Nabízela se tedy varianta vypínat v daném intervalu nejen proudění, ale zároveň i nadzvednout měřicí člen a zaznamenat odchylku, která na vahách zůstávala.

Tuto domněnku potvrdil i experiment, při kterém byl celý měřicí člen v daném intervalu vždy nadzvednut. Odchylka vznikající vlivem předchozího proudění a zatížení vah byla zapsána. Poté byl člen vrácen zpět a znovu zvážen. Pro vykreslení sušících křivek byla tato odchylka započítaná a průběh sušení vycházel z přesných hodnot.

Poslední konstrukční úprava prototypu přístroje tedy spočívala v doplnění zvedacího elementu a následné propojení prototypu přístroje s řídicí PLC jednotkou. V současné době probíhá veškeré měření na takto upraveném prototypu přístroje, následující experimenty již nejsou zatíženy konstrukční chybou přístroje.

## 6.4 Ověření opakovatelnosti měření

Pro ověření opakovatelnosti a funkčnosti upraveného prototypu přístroje byl naplánován následující experiment. Jako referenční vzorek byl zvolen vzorek ze 100% bavlněné tkaniny, s parametry uvedenými v tabulce 7.

Před vlastním měřením byly všechny vzorky klimatizovány v standardních podmínkách laboratoře ( $20 \pm 2$  °C a  $65 \pm 4$  %) po dobu 24 hodin. Následně byly vzorky zváženy na analytických vahách v klimatizovaném stavu. Tato hodnota je braná jako výchozí referenční hmotnost, dále označovaná jako hmotnost vzorků v klimatizovaném stavu, nebo-li hmotnost suchého vzorku. V dalším kroku byly opět vzorky ponořeny do destilované vody o teplotě  $20 \pm 2$  °C, po uplynutí minimálně 3 hodin byly vyjmuty a položeny na savý papír po dobu 5 minut, poté umístěny na měřicí destičku přístroje a zváženy. Od tohoto okamžiku byl zapisován čas sušení. Veškerá měření byla provedena při třech rychlostech proudění vzduchu, a to: 2, 3, 4  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Každý vzorek byl změřen třikrát.

Konec sušení byl stanoven podle přesnosti vah. Přesnost vah činí  $\pm 0,05$  g, a proto se za konec testu považoval čas, kdy hmotnost přidané vlhkosti ve vzorku klesla pod hodnotu 0,05 g. Tato hodnota je ve všech grafech označena čárkovanou čarou. Jak bylo zmíněno v rešeršní části, autoři zahraničních studií či norem se na koncovém bodu neshodují. Avšak vzhledem k subjektivnímu vnímání pocitu sucha (jak bylo ověřeno v poslední části této práce) je toto množství přidané vlhkosti v textiliích skutečně zanedbatelné a je možné měření ukončit. Jak bylo očekáváno, nejvyšší rychlosti sušení bylo dosaženo při nastavené rychlosti proudění hlavního ventilátoru na 4  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , nejpomalejší průběh sušení pak při nastavení rychlosti proudění hlavního ventilátoru na 2  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Opakovatelnost měření byla ověřena porovnáním regresních přímk. V těchto testech byla vybrána pouze lineární část křivek (obrázky 28–30), která reprezentuje nejdůležitější část sušení. Tento způsob hodnocení rychlosti sušení byl využit i například ve studii [111]. U regresních přímk lze porovnávat:

- a) regresní přímky mají shodný průsečík na ose y,
- b) regresní přímky mají shodnou směrnici,
- c) regresní přímky jsou identické [129].

V této situaci lze použít pouze body b) a c), protože je vyžadován stejný průběh (rychlost) sušení.

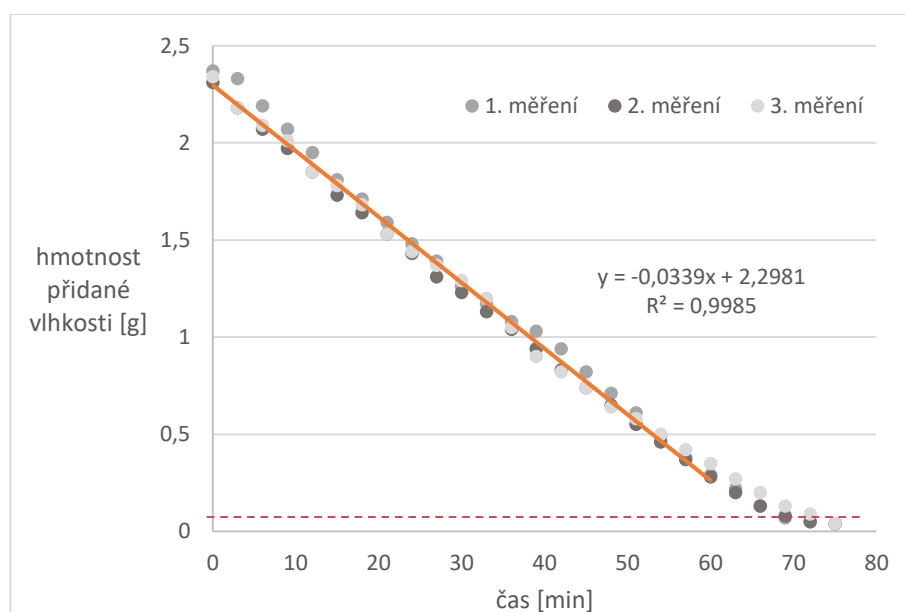
Nejprve byla otestována shoda rozptylů pomocí Bartlettova testu [129]. Byla stanovena nulová hypotéza, že všechny soubory mají konstantní rozptyl (nebo-li sdružený odhad rozptylů lze považovat za odhad rozptylu) oproti alternativní hypotéze, která říká, že alespoň jedna dvojice rozptylů se liší. Hodnoty testačních kritérií pro jednotlivé rychlosti byly: 0,0302 (pro 2  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 0,0117 (pro 3  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) a 0,0138 (pro 4  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

Všechny hodnoty testačních kritérií byly nižší, než je kritická hodnota rozdělení  $\chi^2$ , která je pro tyto případy 5,99. Použitý Bartlettův test tedy potvrdil ve všech realizovaných experimentech konstantní rozptyl na 5% hladině významnosti.

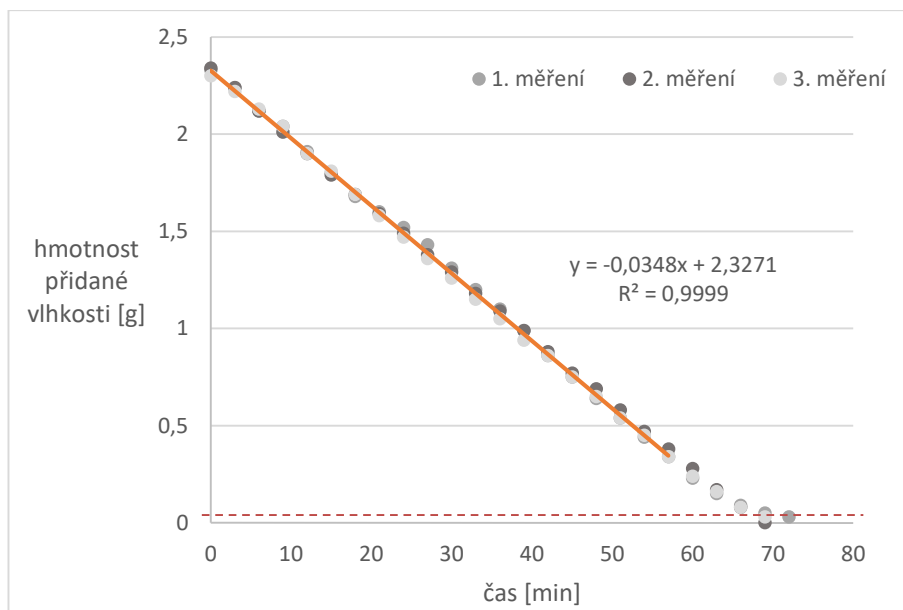
Následující test pro porovnání homogenity směrnic ukázal, že výsledné regresní přímky při pokusech s rychlostí proudění 2, 3 a 4 m·s<sup>-1</sup> jsou rovnoběžné také na 5% hladině významnosti. Hodnoty testačních kritérií byly: 2,77 (pro 2 m·s<sup>-1</sup>), 2,22 (pro 3 m·s<sup>-1</sup>), a 2,03 (pro 4 m·s<sup>-1</sup>) a byly nižší než kritické hodnoty z tabulek Fisher-Snedecorova rozdělení (u rychlosti 2 a 3 m·s<sup>-1</sup> byla kritická hodnota 3,15 a u rychlosti 4 m·s<sup>-1</sup> vycházela kritická hodnota 3,23).

Jednotlivé naměřené hodnoty přidané vlhkosti ve vzorkách v daných časových intervalech jsou uvedeny v příloze 2. První prezentované výsledky tedy potvrzují, že opakovatelnost měření dosažená pomocí tohoto přístroje je přijatelná.

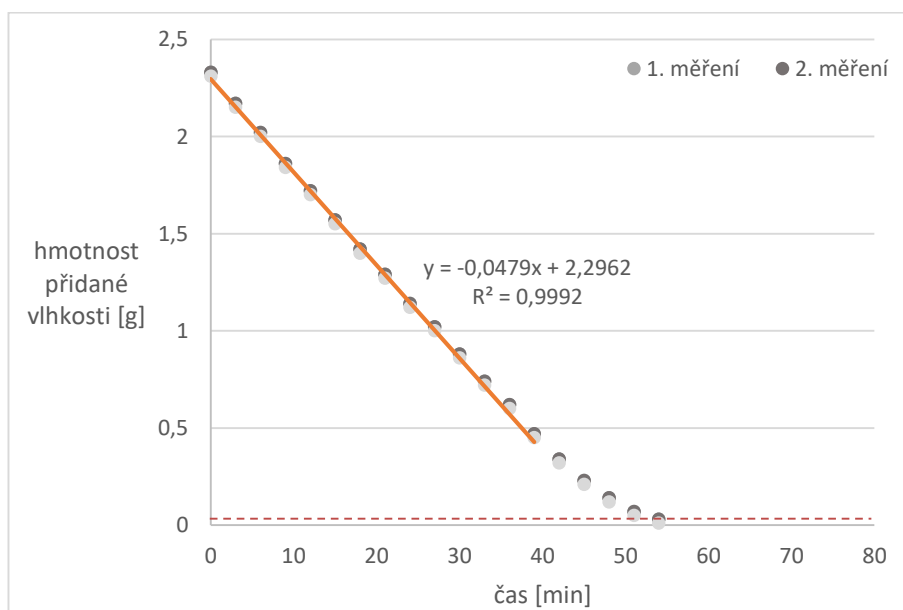
Naměřené sušící křivky ostatních vzorků (T-BA/PP a T-PP) jsou součástí článku [130]. Na ose y v grafech na obrázcích 28-30 jsou uvedené absolutní hodnoty přidané vlhkosti v gramech. Množství přidané vlhkosti vychází ze schopnosti vzorku zadržovat vlhkost ve své struktuře. Je to především z toho důvodu, aby bylo možné spočítat z naměřených dat rychlost sušení a porovnat ji s teoretickou hodnotou. Tento způsob zvolili ve své studii i například Chau a kol. [111]. V některých studiích [83] jsou hodnoty přidané vlhkosti vyjádřeny jako relativní podíl hmotnosti přidané vlhkosti a hmotnosti vzorku v klimatizovaném stavu. V této práci byl tedy vybrán způsob, kdy je množství přidané vlhkosti vyjádřeno v gramech. Pokud není uvedeno v následujícím textu uvedeno jinak, vztahuje se vždy obsah přidané vlhkosti na plochu vzorku (0,00728 m<sup>2</sup>).



Obr. 28 Sušící křivky pro T-BA při rychlosti proudění 2 m·s<sup>-1</sup>



Obr. 29 Sušící křivky pro T-BA při rychlosti proudění  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



Obr. 30 Sušící křivky pro T-BA při rychlosti proudění  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Dle výsledků z grafů na obrázcích 28–30 je patrné, že se zvyšující se rychlostí proudění vzduchu klesá celková doba sušení a zároveň i rychlost sušení v lineární části křivky. Celková doba sušení u rychlosti proudění vzduchu nad vzorkem  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  činí 75 minut, u  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  69 minut a u  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  54 minut. Vzhledem k náročnému klimatizování prostor laboratoře byly klimatické podmínky pro všechny následující experimenty upraveny tak, aby odpovídaly dle normy ČSN ISO 139 [121] tzv. “Alternativnímu normálnímu ovzduší”, tj. teplotě  $23 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a relativní vlhkosti  $50 \pm 4 \text{ } \%$ .



## 7 Analýza sušících křivek

Tato kapitola se zabývá analýzou naměřených sušících křivek pletenin, které se standardně používají pro výrobu spodního prádla. Cílem této kapitoly je porovnat jednotlivé metody vlhčení vzorků, vyhodnotit vliv rychlosti proudění vzduchu nad měřenými vzorky a porovnat izotermní a neizotermní podmínky měření vzhledem k rychlosti sušení.

### 7.1 Vybrané materiály a příprava vzorků

Pro účely následných experimentů byly vybrány materiály, které se běžně používají pro výrobu spodní vrstvy, u které je právě rychlost sušení pro vnímání pocitu tepelného komfortu stěžejní. Jedná se o dva soubory pletenin, jeden soubor obsahuje zátažné oboulící hladké pleteniny a druhý soubor zátažné jednolící hladké pleteniny. Všechny vzorky byly vyrobeny z přízí o stejných jemnostech a podobnými konstrukčními parametry. Jednotlivé vzorky se liší především v plošné hmotnosti. Odběr vzorků probíhal dle normy [123]. Všechny vzorky byly před samotným testováním vyprány a vysráženy. Následně byly ještě zbaveny případných nečistot v ultrazvukové čističce. Tabulky 8 a 9 zobrazují konstrukční parametry vybraných textilií. Jednotlivé parametry byly zjišťovány v souladu s normami [124, 125]. Délka nitě v očku byla spočítána pomocí modelu Dalidoviče [131], který se používá pro středně hustou pletenou strukturu. Objemová porozita byla spočítána podle [131].

Tab. 8 Specifikace vzorků – oboulící zátažné hladké pleteniny

Značení vzorku		P-BA	P-PE	P-MO	P-TE	P-MMO	P-VI	P-ME
materiálové složení vzorku		100% bavlna	100% polyester	100% modal	100% viskóza (tencel)	100% mikromodal	100% viskóza	100% vlna (merino)
plošná hmotnost	[g·m <sup>-2</sup> ]	205	189	163	182	173	162	280
tloušťka textilie	[mm]	0,7	0,7	0,74	0,69	0,69	0,59	0,9
měrná hmotnost klimatizovaných vláken [50]	[kg·m <sup>-3</sup> ]	1530	1380	1520	1520	1520	1520	1320
hustota sloupků	[10 cm <sup>-1</sup> ]	112	105	100	100	90	88	135
hustota řádků	[10 cm <sup>-1</sup> ]	150	150	155	150	160	160	140
rozteč sloupků	[mm]	0,89	0,95	1	1	1,11	1,14	0,74
rozteč řádků	[mm]	0,67	0,67	0,65	0,67	0,63	0,63	0,71
jemnost přízí	[tex]	20	20	20	20	20	20	20
délka nitě v očku	[mm]	3,3	3,4	3,4	3,5	3,6	3,6	3,2
průměr příze	[mm]	0,18	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18	0,2
porozita	[%]	58	55	62	60	61	55	59

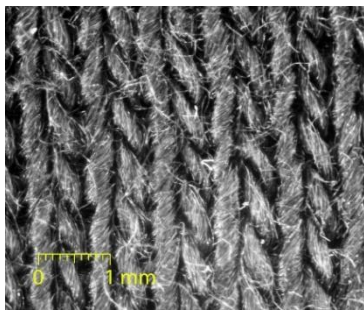
Tab. 9 Specifikace vzorků – jednolící zátěžné hladké pleteniny

označení vzorku		P-COOL	P-PVC
materiálové složení vzorku		100% polyester (coolmax)	100% polyvinylchlorid
plošná hmotnost	[g·m <sup>-2</sup> ]	174	188
tloušťka textilie	[mm]	0,4	0,4
měrná hmotnost klimatizovaných vláken [50]	[kg·m <sup>-3</sup> ]	1380	1360
hustota sloupků	[10 cm <sup>-1</sup> ]	105	110
hustota řádků	[10 cm <sup>-1</sup> ]	300	300
rozteč sloupků w	[mm]	0,95	0,91
rozteč řádků c	[mm]	0,33	0,33
jemnost příze	[tex]	20	20
délka nitě v očku	[mm]	2,8	2,7
průměr příze	[mm]	0,19	0,19
porozita	[%]	37	34

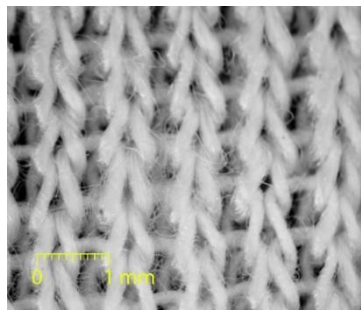
### Příprava vzorků a vyhodnocení naměřených dat

Před každým měřením byly z jednotlivých vybraných materiálů vystřiženy vzorky o rozměru 8 x 9,1 cm. Odběr vzorků probíhal dle normy [123]. Následně byly všechny vzorky ponechány v klimatických podmínkách laboratoře (alternativní zkušební prostředí:  $t_a = 23 \pm 2$  °C a  $RH = 50 \pm 4$  %) po dobu 24 hodin. Vzorky byly zváženy, jejich hmotnost byla označena jako hmotnost vzorku v klimatizovaném stavu. Poté byla zvolena metoda vlhčení vzorku. Následně byl vzorek umístěn na měřicí jednotku.

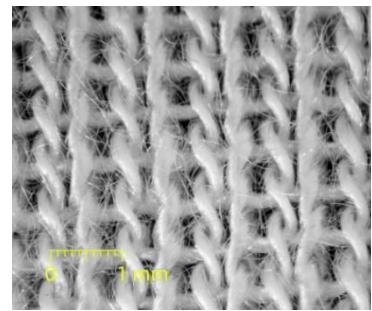
Měření bylo zahájeno v okamžiku zapnutí ventilátoru. Aktuální hmotnost zavlhčeného vzorku byla zapisována automaticky v programu, který byl propojen s váhami. Z naměřených dat byla spočítána hmotnost zbývající vlhkosti ve vzorku. Každý vzorek byl změřen třikrát. V následujících grafech jsou již zaznamenány pouze průměrné hodnoty aktuální hmotnosti přidané vlhkosti v daném časovém intervalu. Pokud není uvedeno jinak, vztahuje se hmotnost vlhkosti vždy na stejnou plochu vzorku 0,00728 m<sup>2</sup>. V jednotlivých grafech je vyhodnocena pomocí lineární regrese rychlost sušení v lineární části sušících křivek.



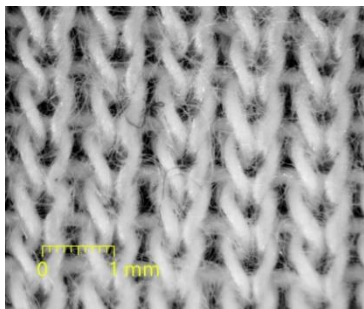
(a)



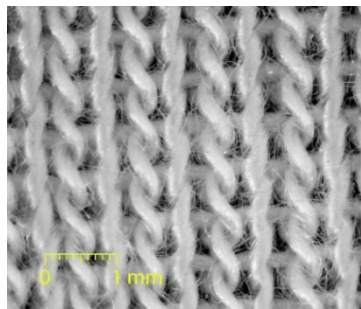
(b)



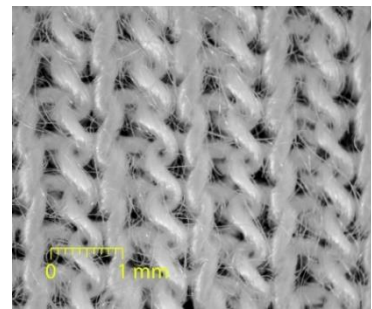
(c)



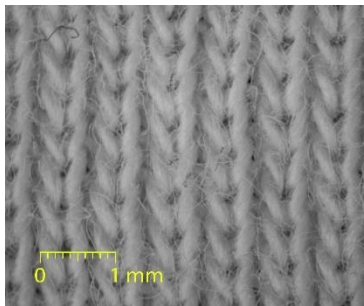
(d)



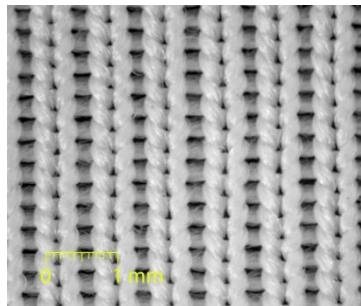
(e)



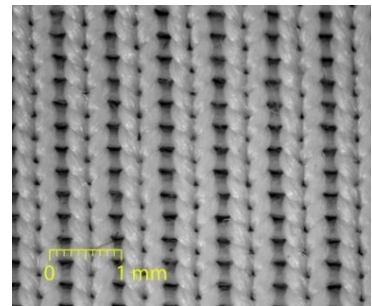
(f)



(g)



(h)



(i)

Obr. 31 (a) P-BA, (b) P-PE, (c) P-MO, (d) P-TE, (e) P-MMO, (f) P-VI, (g) P-ME, (h) P-COOL, (i) P-PVC

## 7.2 Porovnání metod vlhčení vzorků A a B

K otestování nové metodiky byly vybrány dva odlišné způsoby vlhčení vzorků a dvě rychlosti proudění ( $1$  a  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) nad měřeným vzorkem. Tyto dvě rychlosti proudění se standardně využívají pro testování jiných komfortních vlastností, například výparného či tepelného odporu.

Jak bylo podrobněji zmíněno v rešeršní části v kapitole 5.2.1 autoři odborných studií zabývajících se sušením se ve způsobu vlhčení vzorků neshodují. V zásadě se objevují dva odlišné způsoby vlhčení. První z nich vychází z vlhčení celých vzorků dle jejich schopnosti zadržovat vlhkost [74, 79] a druhý používá aplikaci přesně stanoveného množství kapaliny [73, 111].

Princip vlhčení vzorků ponořením celého vzorku do kapaliny používali autoři studií [82, 101, 105]. Tento způsob určení množství retenční (přidané) vlhkosti pro zavlhčení vzorku vychází z norem [74, 79]. Následné vlhčení vzorku však u amerických norem [74, 75] probíhá pomocí pipety. Oproti tomu japonská norma [79] popisuje jiný postup. Nejprve se vzorek namočí do vodní lázně po dobu minimálně 3 hodin, vyjme se a po uplynutí deseti minut je takto navlhčený vzorek vložen na rám měřicího přístroje. Tyto rozdílné způsoby zavlhčení proto poskytují i rozdílné výsledky, protože se liší nejen v rozdílném množství počátečního zavlhčení vzorků (rozdílná celková doba sušení), ale také ve velikosti zavlhčené plochy vzorků (odlišné rychlosti sušení v lineární části sušících křivek).

Chau a kol. [111] ve své studii zdůrazňují, že je vhodnější způsob vlhčení pomocí pipety. A to z toho důvodu, že přesně stanovené množství vlhkosti totožné pro všechny měřené vzorky lépe simuluje reálný případ zavlhčení oděvu potem při jeho nošení, resp. lidé volí oděv s ohledem na klimatické podmínky a očekávanou fyzickou zátěž, podle kterých vyberou oděv z textilie o vhodné tloušťce a plošné hmotnosti. Pokud množství aplikované vody vychází z plošné hmotnosti vzorků [65, 102, 103] nebo z množství retenční vlhkosti [74, 75], neodpovídá to dle nich tak dobře reálným podmínkám nošení oděvů.

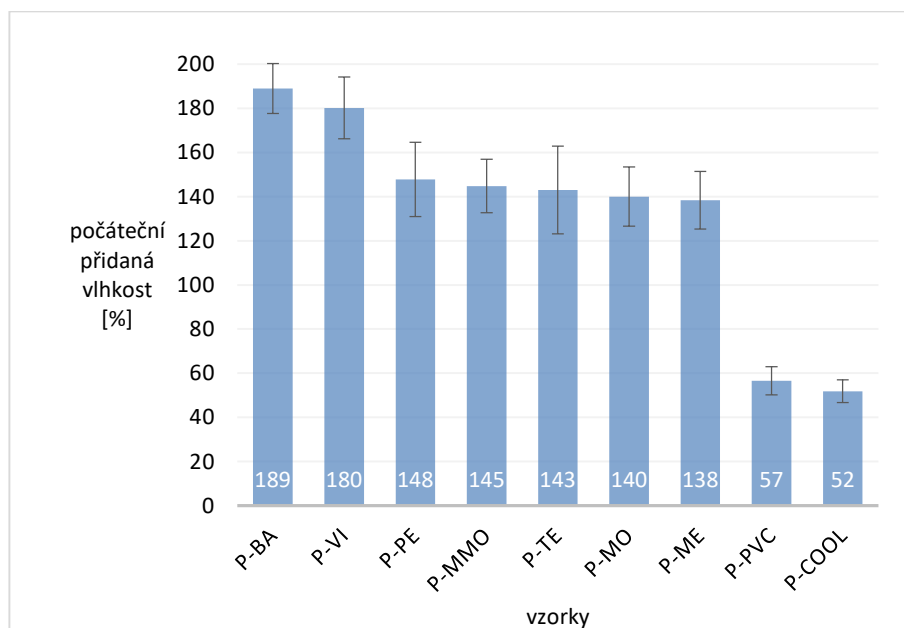
Vzhledem k nejednotnosti u ostatních autorů i jednotlivých norem byly navrženy pro testování nové metodiky dva způsoby vlhčení, zde označené jako metoda A a B. U obou metod probíhá vlhčení pomocí destilované vody.

### Metoda A

a) U této metody je celý vzorek ponořen po dobu nejméně 3 hodin do kapaliny a následně ponechán k okapání po dobu 10 minut na své papírové utěrce, aby ze vzorku neodkapávala kapalná vlhkost. Původní doba byla stanovena na 5 minut, avšak některé vzorky po pěti minutách stále vykazovaly vysoký stupeň zavlhčení, nevhodný při manipulaci se vzorkem na rám měřicí destičky. Čas k odkapání byl proto upraven na 10 minut. Podobný princip využíval ve své studii i Crow [101], nebo norma [79].

Po uplynutí této doby se stanoví počáteční retenční vlhkost ve vzorku (množství absorbované vlhkosti) jako poměr hmotnosti vzorku po navlhčení a před navlhčením (hmotnost vzorku v klimatizovaném stavu). Jako hmotnost před navlhčením je tedy označena hmotnost vzorku v klimatizovaném stavu dle klimatických podmínek laboratoře. Při vlhčení touto metodou jsou všechny vzorky zavlhčeny rovnoměrně po celé ploše, avšak mají ve své struktuře odlišné množství vlhkosti dle jejich schopnosti zadržet vodu nejen uvnitř vláken, ale především ve své struktuře. Aby bylo zajištěno stejné zavlhčení pro všechna měření od jednoho typu materiálu, je nutné nejprve spočítat počáteční hmotnost retenční vlhkosti pro každý materiál z několika opakovaných měření, jak je patrné z grafu na obrázku 32 a následně stejným způsobem zavlhčený vzorek umístit na měřicí člen. Ve chvíli, kdy hmotnost přidané vlhkosti odpovídá hmotnosti vypočítané z retenční schopnosti daného materiálu, může být zahájeno měření.

U metody A tedy není rychlost sušení ovlivněna schopností materiálu šířit vlhkost v ploše. To lze považovat za určitou nevýhodu, protože se jedná o vlastnost, která významně ovlivní velikost zavlhčené plochy a tím pádem i rychlost sušení v případě běžného pocení při skutečném nošení oděvu. Na principu rychlého rozvodu vlhkosti do velké plochy právě funguje většina textilií vhodná na spodní oděvní vrstvu, pro které se vžil obecný pojem “funkční prádlo”. Hodnoty počáteční retenční (nebo-li přidané) vlhkosti ve vzorkách ilustruje graf na obrázku 32.



Obr. 32 Počáteční přidaná (retenční) vlhkost vztahovaná k hmotnosti vzorků v klimatizovaném stavu

Z naměřených dat lze potvrdit, že mezi vzorky P-BA a P-VI není významný rozdíl v množství počáteční vlhkosti vzhledem k hmotnosti vzorku v klimatizovaném stavu, která dosahuje cca 180%. Téměř shodné hodnoty mají vzorky P-PE, P-MMO, P-TE, P-MO a P-ME, jejich hodnoty se pohybují okolo 140 %.

Nejnižší počáteční množství vlhkosti lze pozorovat u vzorků P-PVC a P-COOL, která je více než 3x nižší než u vzorků P-BA a P-VI, a nepřesahuje 60 %. Tyto dva vzorky se liší od ostatních nejen vazbou a téměř poloviční tloušťkou, ale také tím, že jsou z profilovaných vláken.

U některých oboulícnicích vzorků (P-BA, P-VI) dosahuje množství zadržené (přidané) vlhkosti téměř dvojnásobku původní hmotnosti vzorku. Oproti tomu u syntetických materiálů jednolícnicích s hustě pletenou strukturou byl tato hodnota velmi nízká a nedosahuje ani násobku původní hmotnosti klimatizovaného vzorku. Výjimku tvořil oboulícnicí vzorek P-PE ze 100% polyesterové příze, který i přes nízkou navlhavost jednotlivých vláken dosáhl podobné hodnoty retenční vlhkosti jako vzorky z přírodních vláken. Tohoto jevu lze docílit pomocí například optimální hustotou zákrutů a využití mikrovláken. Kvůli nim se vytvoří vnitřní relativně dostupný povrch, který umožní zadržení většího množství vlhkosti.

U volných textilií, které nepřiléhají na pokožku, je žádoucí relativně vysoký stupeň nasákavosti za podmínky, že textilie i při zavlhčení zůstane dostatečně paropropustná. Tímto jsou například vyloučeny husté bavěné tkaniny typu denim. Naopak u přiléhavých textilií s podílem elastických vláken může být většina chladicího efektu realizována z povrchu vlhké textilie, proto není vysoká paropropustnost dramaticky nezbytná, to znamená, že i relativně husté, nepříliš silné textilie s vysokou nasákavostí a navlhavostí mohou poskytnout dostatečný chladicí efekt. V obou případech je krátká doba sušení velmi žádoucí, protože suché textilie jsou daleko lépe paropropustné, než mokré textilie. Navíc intenzivní krátkodobý chladicí efekt je vítán při většině fyzických aktivit. Obecně vysoký chladicí efekt můžeme očekávat u textilií s velkou vlhkosměnnou plochou při nízké adhezi vody vůči vláknům.

V extrémních případech (například v horkých a suchých klimatických podmínkách: vysoká teplota a nízká relativní vlhkost vzduchu), kdy je naopak požadován dlouhodobý a nepříliš intenzivní chladicí efekt, jsou vhodné materiály s vysokou absorpční schopností na bázi bavlny a viskózy. I u nich je však nutné, aby textilie zajišťovaly dobrou paropropustnost ve vlhkém stavu. V tomto případě dokonce dlouhodobý chladicí efekt převládá nepříjemný pocit lepivosti vlhké textilie. Pro materiály určené na spodní vrstvu je tedy vyšší absorpční či retenční schopnost a s tím související i smáčivost nutná za podmínek, že bude vlhkost rozvedena do větší plochy a následně odpařena. Výjimku tvoří vlněná vlákna, která dokáží zajistit tepelný komfort i při vyšším zavlhčení. Jedním z důvodů je schopnost vlněných vláken tzv. uzamknout vlhkost uvnitř vlákna. Povrch vlákna zůstane suchý.

## Metoda B

Druhý způsob vlhčení (dále označeno jako metoda B) využívá aplikaci přesně definovaného množství vlhkosti na vzorek pomocí pipety. Toto množství aplikované vlhkosti bylo experimentálně stanoveno tak, aby nedocházelo k šíření vlhkosti mimo okraj vzorku, v tomto případě celkem  $1 \pm 0,05$  g vlhkosti. Klimatizovaný vzorek se upne do rámu měřicího přístroje.

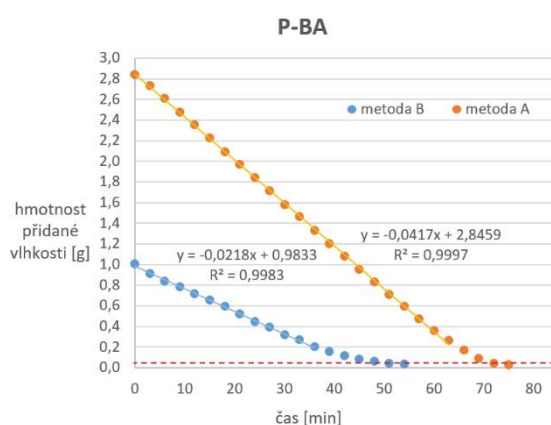
Následně se na něj nanese na tři místa ve středové části vzorku vždy 0,33 g destilované vody (celkem tedy 1 g). Vzorek se zakryje fólií a počká se 15 minut, aby vlhkost vyvzlínala do všech stran. Po celou dobu 15 minut je vzorek zakrytý a uzavřen v kanálu, aby nedocházelo k odparu vlhkosti. U této metody je ve všech vzorcích stejné počáteční množství aplikované vlhkosti, avšak jednotlivé vzorky se významně liší ve velikosti zavlhčené plochy podle jejich schopnosti šířit vlhkost v ploše.

Následující část experimentální kapitoly porovnává obě metody vlhčení. Pro každý materiál byla provedena tři opakování, v následujících grafech jsou již vyneseny pouze průměrné hodnoty v daných časových intervalech. Rychlost proudění nad vzorkem byla nastavena na  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Jednotlivé grafy na obrázcích 33 a 34 zobrazují celý průběh sušení s důrazem na lineární část, kdy je nejvýraznější chladicí efekt, nebo-li nejvyšší rychlost sušení.

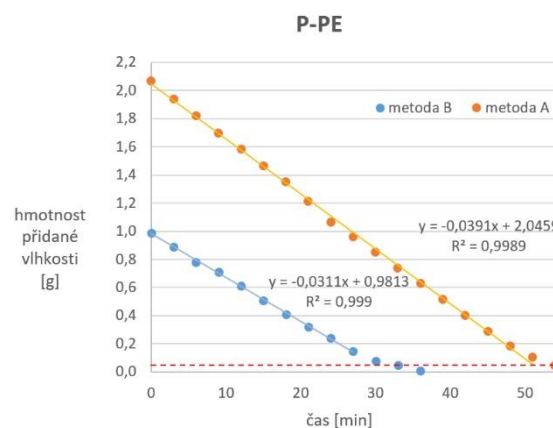
Způsob hodnocení textilií pomocí určení rychlosti sušení pouze v lineární části sušící křivky používali ve své studii [111] například i Chau a kol. nebo Yanilmaz a kol. [65]. Z tohoto důvodu byl zároveň s analýzou naměřených sušících křivek proveden experiment popsán v kapitole 8. Cílem tohoto experimentu bylo zjistit, jakým způsobem ovlivňuje množství přidané vlhkosti na konci lineární části komfortní vjem uživatele podle jeho pocitu vnímání vlhka či sucha. I přes to, že v tomto bodě u některých textilií (především z přírodních vláken) uživatelé vnímali mírný pocit vlhka, považovali jej z hlediska celkového vnímání termofyziologického komfortu za téměř nevýznamný. Tímto způsobem tedy byla ověřena možnost a význam hodnocení sušících charakteristik jednotlivých textilií pomocí rychlosti sušení v lineární části sušící křivky.

Pro přesnější určení koncového bodu lineární části sušící křivky byla využita metoda pro nalezení tzv. bodu zlomu pomocí statistického programu R [132], která přesněji definovala konec lineární části sušení. Nalezení bodu zlomu na následujících naměřených sušících křivkách shrnuje příloha 7. Tento bod na křivce odpovídá dle odborné literatury [81, 82] tzv. kritickému bodu. Od tohoto okamžiku se děj sdílení hmoty zpomaluje a převažuje uvolňování vlhkosti zevnitř přízí a vláken. V lineární části každé sušící křivky jsou data proloženy regresní přímkou, u které je spočítán koeficient determinace. Spočítané koeficienty determinace u všech naměřených dat byly vyšší než 0,99, tato hodnota potvrzuje vhodnost použití daného lineárního modelu. Také je u všech naměřených dat vyhodnocena celková doba sušení.

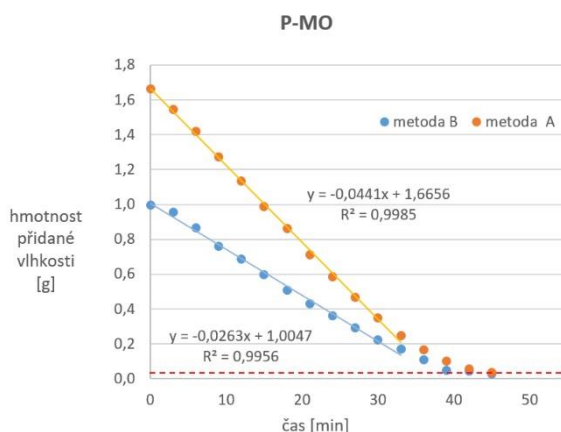
Koncový bod sušení určuje v jednotlivých grafech čárkovaná čára a vychází z přesnosti vah. Proces sušení je tedy považován za ukončený ve chvíli, kdy hmotnost zbývající přidané vlhkosti ve vzorku klesne pod 0,05 g. U vzorků z přírodních vláken by dosažení nulové hodnoty trvalo velmi dlouho, avšak množství vlhkosti je již hlediska vnímání termofyziologického komfortu zanedbatelné. Aby bylo možné uvedené metody mezi sebou porovnávat a určit rychlost sušení v lineární části, bylo nutné ponechat v grafech absolutní hodnoty přidané vlhkosti v daných časových intervalech. Naměřené hodnoty zbývající přidané vlhkosti ve vzorkách jsou uvedeny v příloze 3.



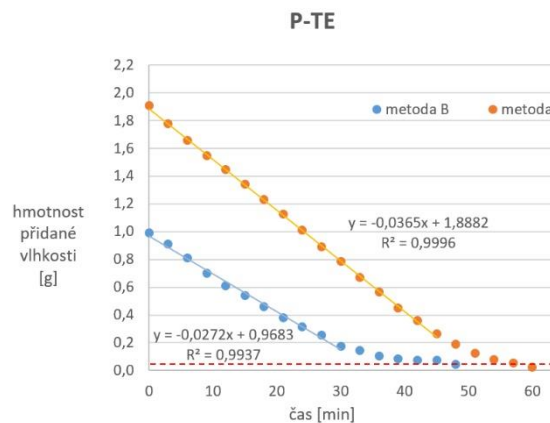
(a)



(b)

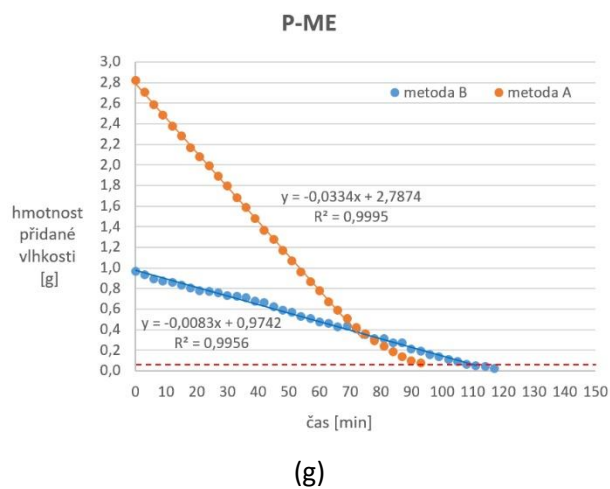
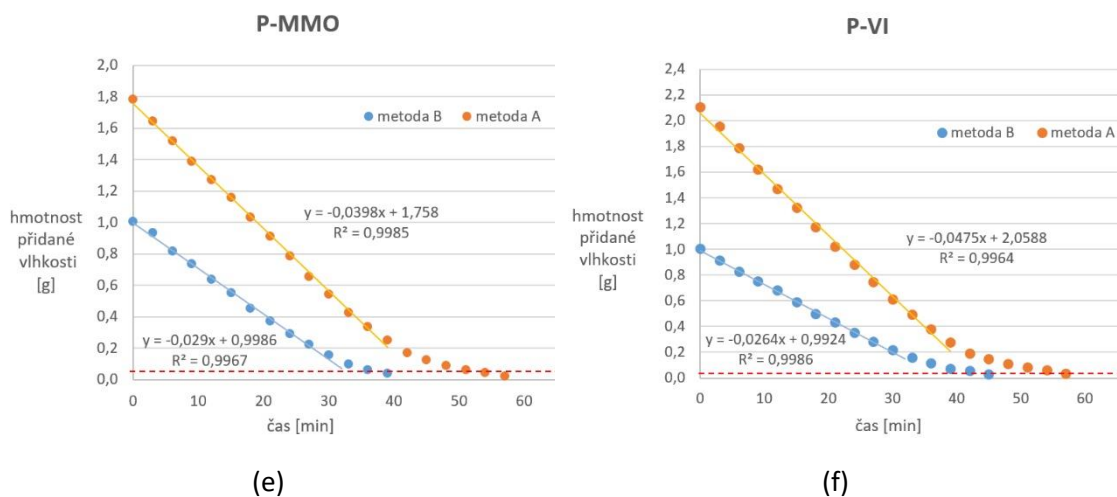


(c)

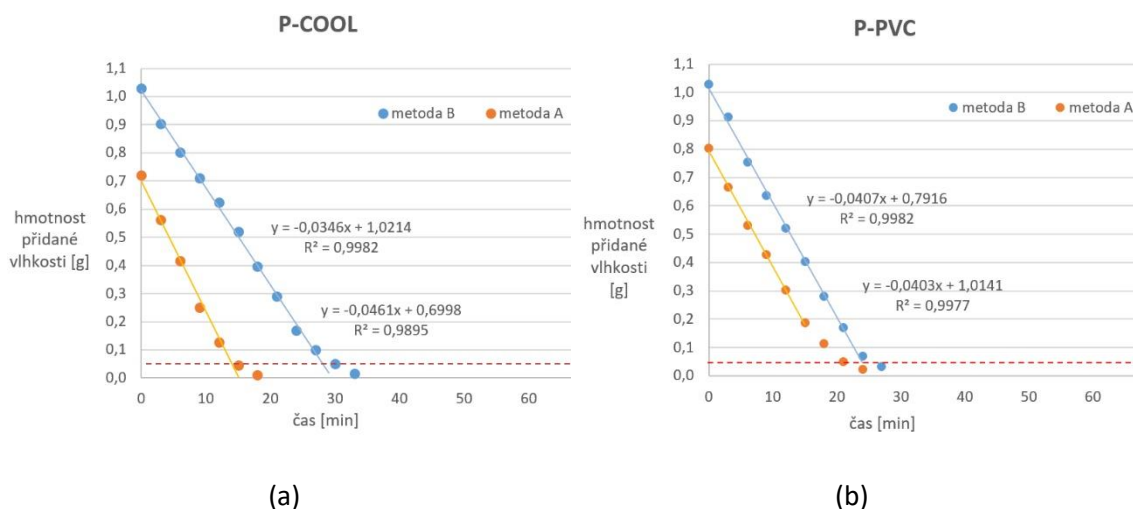


(d)



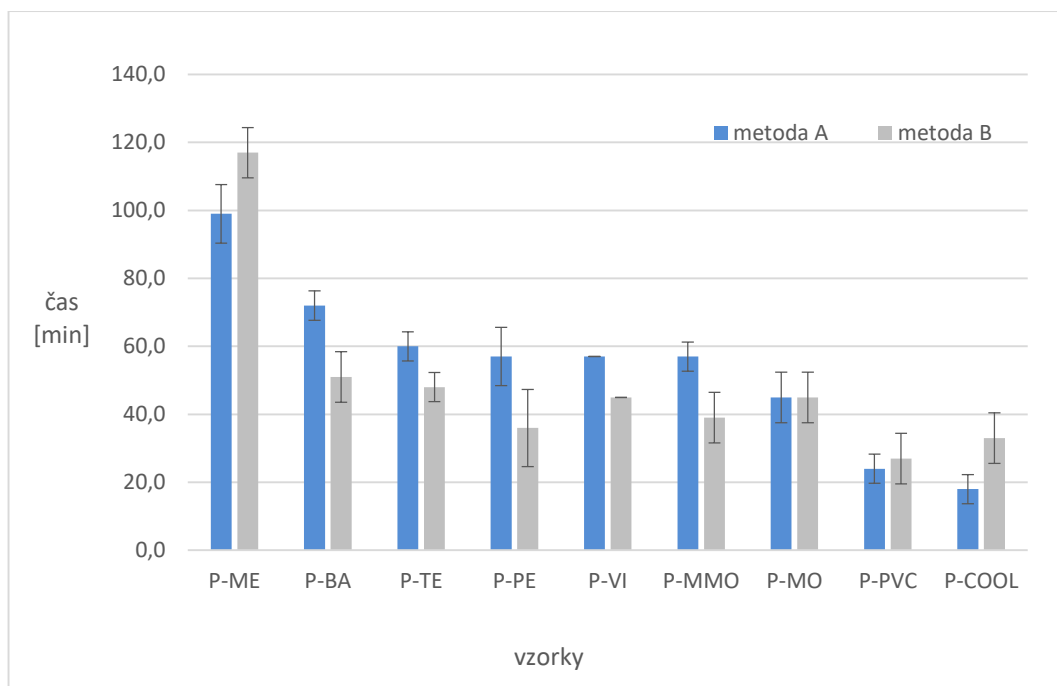


Obr. 33 Porovnání sušících křivek pro metodu A a B – obouliční vzorky  
(a) P-BA, (b) P-PE, (c) P-MO, (d) P-TE, (f) P-MMO, (f) P-VI, (g) P-ME

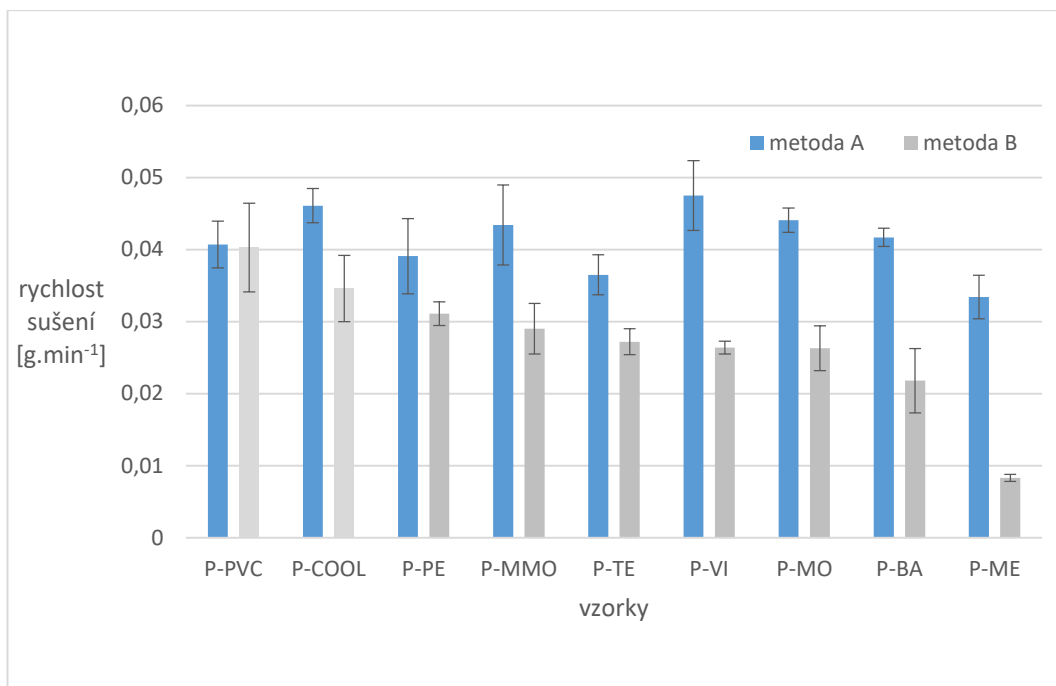


Obr. 34 Porovnání sušících křivek pro metodu A a B – jednolichní vzorky (a) P-COOL, (b) P-PVC

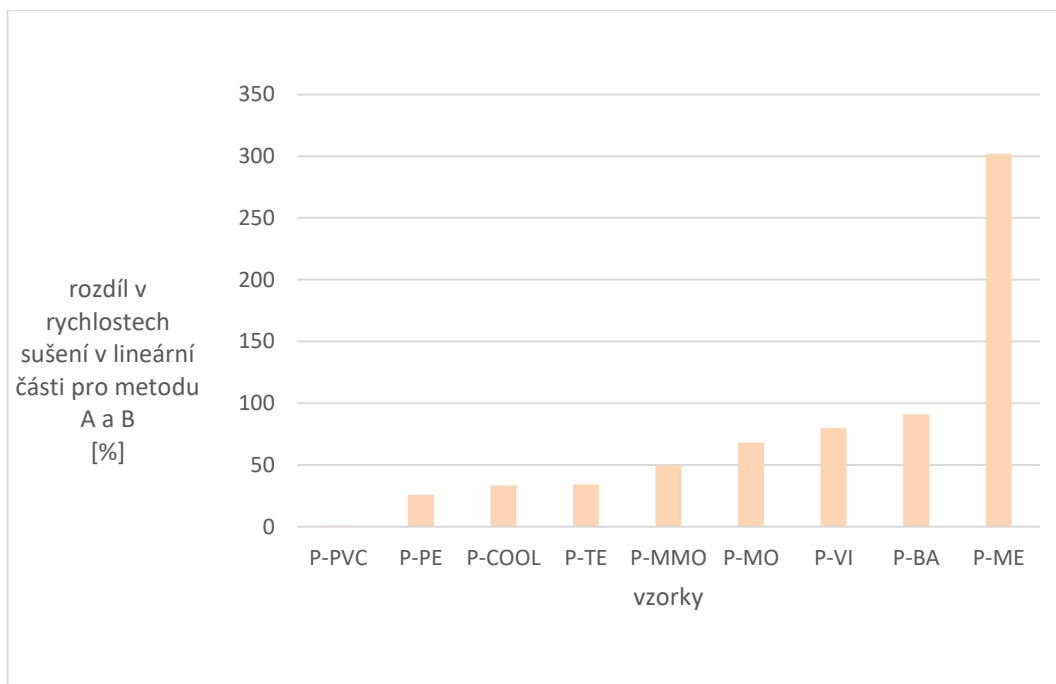
Z předchozích grafů na obrázcích 33 a 34 je patrná výrazná linearita sušících křivek. Je to zřejmě tím, že v této práci se dařilo udržet teplotu sušeného vzorku na teplotě okolí díky dobrému tepelnému kontaktu vzorku s ohřívacím žebrem přístroje. Z toho důvodu nedochází k většímu poklesu teploty v textilií, který bývá v experimentech u ostatních autorů [82, 105, 111], či norem [78, 79].



Obr. 35 Celková doba sušení pro metodu A a B



Obr. 36 Porovnání rychlostí sušení v lineární části pro metodu A a B



Obr. 37 Rozdíl v rychlostech sušení v lineární části u jednotlivých metod vlhčení

Z naměřených dat jsou patrné výrazné rozdíly mezi oběma metodami nejen v celkové době sušení (graf na obrázku 35), ale i v rychlosti sušení v lineární části (grafy na obrázcích 36 a 37). Pokud bychom se zaměřili na celkovou dobu sušení, jsou rozdíly u metody A dány především rozdílným množstvím zadržené vlhkosti (retenční vlhkosti), kterou ilustroval graf na obrázku 32.

Rozdílný obsah vlhkosti u celého zavlhčeného vzorku (metoda A) ale neovlivňuje rychlost sušení v lineární části, jak potvrzují studie [87, 88].

### **Celkový čas sušení pro metodu A a B**

Díky rozdílnému obsahu počáteční retenční vlhkosti jednotlivých vzorků a rozdílné struktuře se projeví i výrazný rozdíl v celkové době sušení u metody A, kterou lze pozorovat v grafu na obrázku 35. I přes to, že například vzorek P-ME absorboval poměrně málo vlhkosti oproti třeba vzorku P-BA P-VI, je celková doba sušení díky vysoké navlhavosti jednotlivých vláken (a tedy i pomalému uvolňování vlhkosti zevnitř vlákenné struktury) u tohoto vzorku nejdelší. Oproti tomu vzorky P-PVC a P-COOL vykazují i přes nižší rychlost v lineární části velmi krátký celkový čas sušení, což je dáno nejen nízkou nasákavostí celé textilie, ale také velmi nízkou navlhavostí jednotlivých vláken. Z tohoto důvodu je téměř celý průběh sušení lineární a nedochází tak ke zpomalení, jako lze pozorovat u vzorků z přírodních vláken. U metody B je pro všechny vzorky počáteční množství vlhkosti stejné, vzorky se však liší velikostí zavlhčené plochy dle jejich schopnosti šířit vlhkost v ploše. Z tohoto důvodu je i celková doba sušení pro jednotlivé vzorky rozdílná, nejdelší čas sušení opět vykazuje vzorek P-ME, nejkratší celkový čas vzorky P-PVC a P-COOL. Ostatní vzorky nevykazují v celkové době sušení mezi sebou statisticky významný rozdíl.

### **Porovnání rychlosti sušení v lineárních částech křivek u metody A a B**

Rychlost sušení v lineární části křivky je významným parametrem z hlediska hodnocení termofyziologického komfortu. Tuto domněnku potvrdil i experiment, který je podrobněji rozepsán v kapitole 8. Jak již bylo zmíněno, jedná se tedy o část sušení, kdy dochází k uvolňování především volné vlhkosti v textiliích a rychlost sušení je zde ovlivněna klimatickými podmínkami okolí (relativní vlhkost, teplota a rychlost proudění nad sušeným vzorkem) a velikostí efektivní vlhkosměnné plochy. Z grafu na obrázku 36 je patrné, že u metody A nejsou rozdíly mezi jednotlivými vzorky tak výrazné (pohybují se v intervalu od  $0,0334 - 0,0475 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ), jako u metody B, kde je rozpětí naměřených rychlostí odparu vlhkosti z měřeného vzorku mnohem širší ( $0,0083 - 0,0403 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ). Rozdíly mezi jednotlivými vzorky jsou z hlediska komfortu uživatele stěžejní právě pro volbu vhodného materiálu na první oděvní vrstvu (spodního prádla) s ohledem na očekávaný stupeň fyzické aktivity a s tím i spojený předpokládaný stupeň pocení vzhledem k aktuálním klimatickým podmínkám. Metoda A tedy lépe reprezentuje případ, kdy dochází k úplnému propocení první oděvní vrstvy a absorbovaný pot se nemůže rozvést dále do plochy. Skutečná efektivní vlhkosměnná plocha je v tomto případě ovlivněna pouze strukturou textilií.

Metoda B naopak přesněji odráží způsob zavlhčení textilie potem na lidském těle při mírném až středním stupni pocení, kdy nedochází k úplnému zavlhčení textilie a může se zde pozitivně projevit schopnost textilie šířit vlhkost v ploše. U této metody je tedy velikost skutečné efektivní vlhkosměnné plochy ovlivněna nejen strukturou, ale především i schopností textilií šířit vlhkost ve všech směrech.

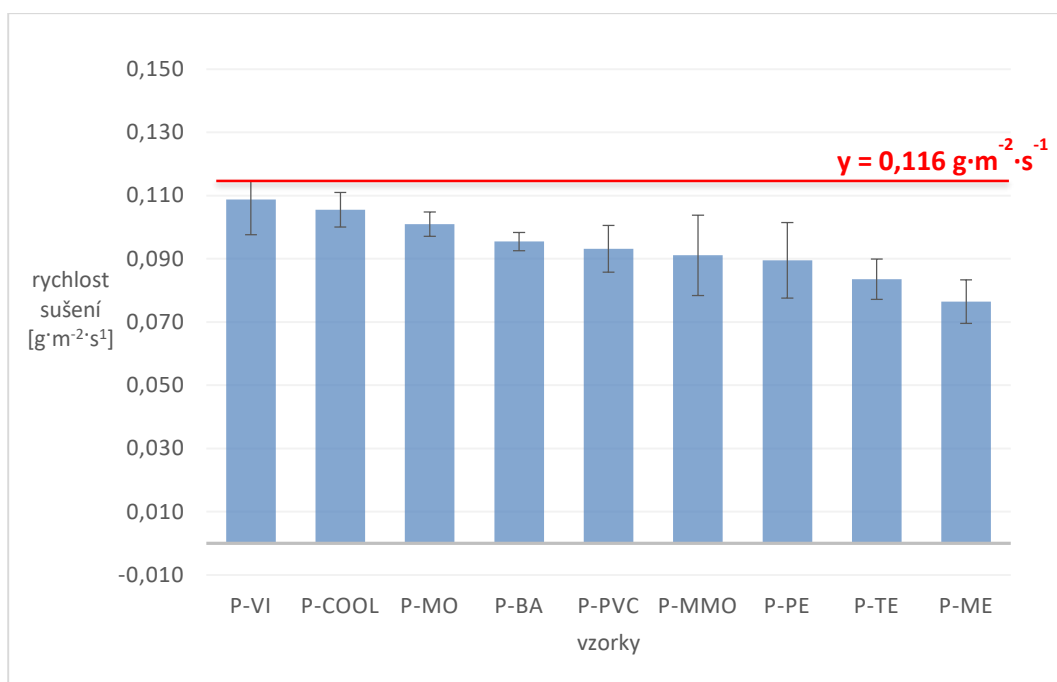
To je patrné především u vzorků ze syntetických vláken (P-PVC, P-COOL, P-PE), kde vzorek P-PVC vykazoval téměř nulový rozdíl v naměřených rychlostech sušení pro obě metody, došlo k tedy rozvodu vlhkosti u metody B po celé ploše vzorku. U vzorku P-PE byla rychlost sušení v lineární části u metody A rychlejší o 26 % a u vzorku P-COOL o 33 %. V tomto případě hraje významnou roli vliv profilovaných vláken u vzorků P-PVC a P-COOL. Vlhkosměnná efektivní plocha je u pletenin ze syntetických, především tvarovaných vláken rozsáhlá, protože díky intenzivnímu vedení vlhkosti v mikrokapilárách dochází k pohybu vlhkosti nejen v rovině, ale i ve směru tloušťky textilie.

U přírodních vláken naopak převažují adhezni síly nad kapilárními, proto je pohyb vlhkosti nižší, dochází tedy k menšímu šíření vlhkosti v ploše. Skutečná efektivní vlhkosměnná plocha je tedy mnohem menší. Proto se i rozdíl v rychlostech sušení v lineární části při porovnání obou metod zavlhčení projevil u vzorků z přírodních vláken (P-ME, P-VI, P-BA, P-MO, P-TE a P-MMO) nejvýrazněji. Například u vzorku P-ME se rychlost při celé zavlhčené ploše zvýšila o 302 %, u P-BA o 91 %, u P-VI o 80 %, u P-MO o 68 %, u P-MMO o 50 % a P-TE o 34 %.

Jak je z grafu na obrázku 36 patrné, větší rozdíly v rychlostech sušení vykazuje metoda B. U této metody tvoří rozdíl v rychlostech mezi vzorkem s nejpomalejší rychlostí sušení a vzorkem s nejvyšší rychlostí sušení téměř 400 %, u metody A pouze 20 %.

U metody B se tedy daleko lépe projeví rozdíly mezi jednotlivými textiliemi z hlediska schopnosti šířit vlhkost v ploše.

Jak již bylo řečeno v kapitole 2.2.2, lze rychlost sušení v lineární fázi stanovit na základě výpočtu koeficientu přenosu hmoty  $\beta$  a rozdílu parciálních tlaků dle rovnice (43). Tato rovnice vychází z teorie o odparu z volné hladiny a prezentuje tak odpar volné vlhkosti v textiliích. Pro nastavené klimatické podmínky měření ( $t_a = 23\text{ °C}$  a  $RH = 50\%$ ), rychlost proudění  $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) vychází tato hodnota  $0,116\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Rychlost sušení je zde vztažena na plochu o velikosti  $1\text{ m}^2$  a na 1 sekundu. Skutečné množství odpařené vlhkosti se u textilií liší především z důvodu nerovnoměrného povrchu a s tím související i skutečné velikosti zavlhčené plochy (skutečná efektivní vlhkosměnná plocha). Tato hodnota tedy nebude přesně odpovídat velikosti plochy zavlhčeného vzorku, jak je patrné z grafu na obrázku 38. Pro porovnání s teoretickou hodnotou jsou všechny naměřené rychlosti sušení při zavlhčení metodou A vyjádřené v  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  a jsou platné opět pro výše uvedené klimatické podmínky měření ( $t_a = 23\text{ °C}$  a  $RH = 50\%$ , rychlost proudění  $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).



Obr. 38 Porovnání rychlostí sušení v lineární části pro metodu A vzhledem k teoreticky spočítané rychlosti sušení

Z grafu na obr. 38 je patrné, že u všech vzorků vychází efektivní vlhkosměnná plocha menší, než je teoretická hodnota. Rozdíl v rychlostech mezi vzorky není statisticky významný kromě vzorků P-TE a P-ME. Poslední dva vzorky P-TE a P-ME se liší od vzorku P-VI o 25–30%. Rozdílné hodnoty naměřených rychlostí při úplném zavlhčení textilií (v lineárních částech sušících křivek) mezi některými materiály vysvětlují autoři odborných studií více způsoby. Například Yanilmaz a kol. [65] ve své studii popisují, že významný vliv na rychlost sušení a tedy i na velikost efektivní vlhkosměnné plochy má otevřenost struktury a u pletenin hustota sloupků a řádků.

Pleteniny se stejnou vazbou, ale nižší hustotou sloupků i řádků by dle jeho poznatků měly vykazovat vyšší rychlost sušení. Ve svém výzkumu [65] však hodnotil pouze pleteniny z akrylových vláken. Oproti tomu Fourt ve své studii [82] prezentuje, že velikost efektivní vlhkosměnné plochy může zvýšit i mírná chlupatost přízí.

Pokud by se však jednalo o textilie s vysokým a hustým vlasem, může naopak dojít ke zpomalení procesu sušení díky větší vrstvě stojícího vzduchu [82]. Ve své studii však opomíjí vliv režimu proudění a také jsou zde testovány pouze vlněné a bavlněné textilie, avšak bez podrobnější analýzy jejich chlupatosti.

Pro potvrzení těchto domněnek by však bylo nutné otestovat velké množství textilií, které se budou lišit pouze konkrétními konstrukčními parametry. Tato problematika již není součástí této práce a bylo by vhodné ji věnovat samostatný výzkum. Také je nutné vzít v úvahu velkou pružnost a tažnost zátažných oboulícnic i jednolícnic pletenin, která se výrazně projeví ve změně jejich struktury právě při nošení oděvů z nich zhotovených.

Konstrukční parametry pletenin se pro totožný vzorek výrazně změnil v závislosti na stříhovém řešení daného oděvu a také na tom, jakým způsobem bude daný oděv přiléhat k tělu konkrétního nositele, atd. Tento fakt je tedy nutné brát v potaz při návrhu nejen materiálového, ale i konstrukčního řešení funkčního spodního prádla a počítat tedy i surčitou změnou “otevřenosti” dané struktury při napnutí na těle a tím pádem i kladné změně rychlosti sušení oděvu. Obecně je však výhodné (pomineme-li klimatické podmínky v horkém prostředí, kde je naopak žádoucí ochlazování těla nositele), aby oděv těsně přiléhal a tím pádem umožnil lepší kontakt s lidským tělem. To je schopné vlivem vyšší teploty pokožky odvod vlhkosti výrazně urychlit a zároveň snížit nepříjemný pocit škrábavosti či lepidlosti vlhké textilie.

Na linearitu této části sušících křivek má vliv především časová změna velikosti efektivní vlhkosměnné plochy a také přirozené ochlazení textilie kvůli výparnému teplu, které se při tomto procesu spotřebovává. První zmíněný důvod je podmíněn především tím, že s úbytkem vlhkosti v textilií se dostávají do kontaktu se vzduchem i jednotlivá vlákna v přízi a tím pádem se může vlhkost šířit difuzí z mezopórů v přízi a mikropórů zevnitř vláken na povrch textilie a odtud pak konvekci do okolního prostředí. Druhou zmíněnou příčinu však lze do jisté míry ovlivnit ohříváním vzorku například zde navrženým a aplikovaným hliníkovým žebrem. Jak je potvrzeno teoretickým výpočtem v kapitole 6.2 a také experimentem v příloze 1, udrží toto žebro téměř izotermní podmínky během celé doby měření.

Aby nedocházelo k hromadění vlhkosti nad měřeným vzorkem, je zde nastavená rychlost proudění ustáleného proudu vzduchu minimálně na  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Jak již bylo zmíněno teoretická rychlost sušení  $[\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$  nebo-li množství odpařené vlhkosti z volné hladiny lze spočítat dle rovnice (43). Avšak díky složité struktuře plošných textilií je nutné tuto hodnotu upravit dle skutečné efektivní velikosti vlhkosměnné plochy, což zde reprezentuje člen  $(1 - k_I)$  dle rovnice (71). Člen  $k_I$  tedy určuje poměr nezavlhčené plochy a celkové ploše vzorku. Pokud by byla v idealizovaném případě velikost efektivní vlhkosměnné plochy stejná, jako je velikost vzorku, člen  $(1 - k_I)$  by byl roven 1.

$$m^* = \beta_p \cdot (1 - k_I) \cdot \Delta p_p \quad (71)$$

Zároveň je ale nutné si uvědomit, že s poklesem volné hladiny v přístupných místech struktury se začíná uvolňovat i vlhkost z mezopórů v přízi a následně i vlhkost z vnitřku vláken z tzv. mikropórů a tím případně částečně kompenzuje klesající velikost vlhkosměnné plochy. V tabulce 10 jsou spočítané koeficienty  $k_I$ .

Tab. 10 Vypočtené hodnoty  $k_1$  z naměřených dat

Vzorky	P-VI	P-COOL	P-MO	P-BA	P-PVC	P-MMO	P-PE	P-TE	P-ME
$k_1$	0,065	0,093	0,132	0,179	0,199	0,217	0,230	0,281	0,343
<b>efektivní vlhkosměnná plocha [m<sup>2</sup>] (1-<math>k_1</math>)</b>	0,974	0,872	0,819	0,793	0,789	0,758	0,756	0,732	0,663

Z vypočtených koeficientů lze tedy určit velikost efektivní vlhkosměnné plochy v lineární části sušení dle vzorce (71).

Způsob vlhčení pro hodnocení sušících křivek je tedy zásadní pro skutečné hodnocení termofyziologického komfortu s ohledem na způsob použití a předpokládaný způsob zavlhčení textilie během nošení. Dochází-li tedy k mírnému pocení, zůstává například u textilie z vlněných či bavlněných vláken vlhkost pouze v malé lokální oblasti, nešíří se do plochy, jako je tomu u syntetických tvarovaných vláken, kdy je výparná plocha rozsáhlá a proces sušení je výrazně rychlejší. Velikost vlhkosměnné plochy je u metody B ovlivněna především schopností textilií šířit vlhkost v ploše. Naopak u metody A se tato schopnost neprojevuje (textilie je celá zavlhčená) a do popředí se dostává vliv struktury (vazba, pórozita, chlupatost, atd), která ovlivní velikost skutečné efektivní vlhkosměnné plochy.

Z tohoto důvodu nová metodika i nový přístroj umožňuje oba dva způsoby vlhčení. Díky tomu lze otestovat skutečné komfortní vlastnosti materiálů s ohledem na účel použití, či umístění dané textilie na lidském těle dle rozložení potních zón, s různým stupněm zavlhčení textilie.

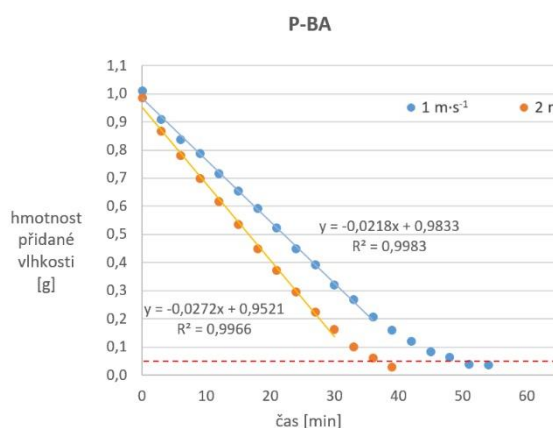
### 7.3 Vliv rychlosti proudění nad měřenými vzorky

V následující kapitole je vyhodnocen vliv rychlosti proudění na rychlost sušení v lineární části křivek znázorňujících průběh sušení. V teoretické části práce jsou zmíněny metodiky, které řeší hodnocení rychlosti a doby sušení textilií. Většina z norem [74, 75] [76, 78] či studií [96, 105, 110] neklade důraz na přesnou rychlost a především druh proudění, kterému jsou textilie během procesu sušení vystaveny. Rychlost proudění však společně s teplotou a relativní vlhkostí patří k zásadním parametrům, které rychlost sušení ovlivňují. Z tohoto důvodu byl navržen a vyvinut zde prezentovaný nový přístroj, který umožňuje nastavit rychlost proudění v rozsahu  $1\text{--}5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Pro hodnocení sušících křivek zde byly vybrány rychlosti  $1$  a  $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , které se standardně používají při hodnocení termofyziologického komfortu dle mezinárodní normy ISO 11092 [68]. Porovnání s metodou bez nucené konvekce okolního vzduchu shrnuje odborný článek [130].

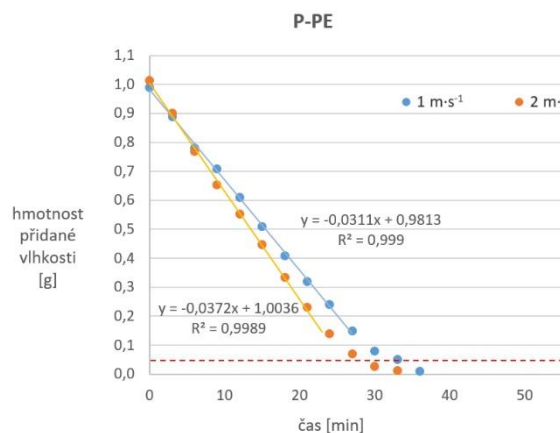
U obou rychlostí byly experimentálně ověřeny rychlostní profily pomocí CTA anemometru. Naměřený stupeň turbulence odpovídal normě ISO 11092 [68]. V příloze 4 je uveden naměřený rychlostní profil pro rychlost proudění  $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .



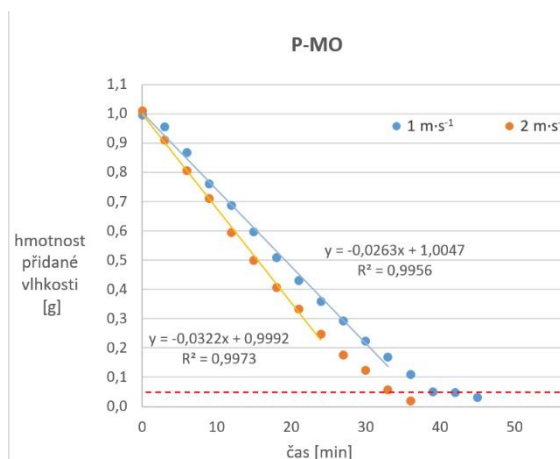
Následující grafy na obrázcích 39 a 40 prezentují naměřené sušící křivky. Jako způsob vlhčení byla vybrána metoda B, a to především z důvodů stejného počátečního množství vlhkosti ve všech vzorkách. Pro porovnání různých textilií je vybrána opět pouze lineární část sušících křivek. Sklon přímky je počítán pomocí lineární regrese. Naměřené hodnoty zbývající přidané vlhkosti ve vzorkách jsou uvedeny v příloze 5.



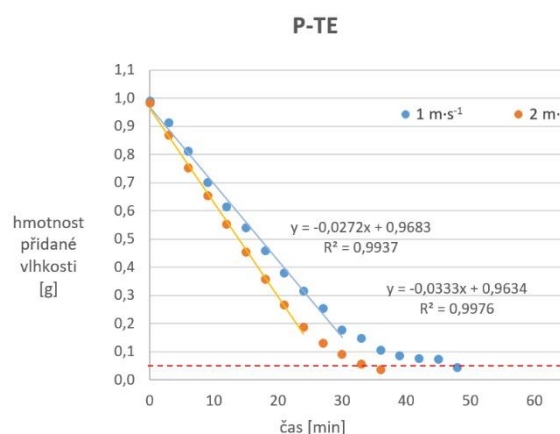
(a)



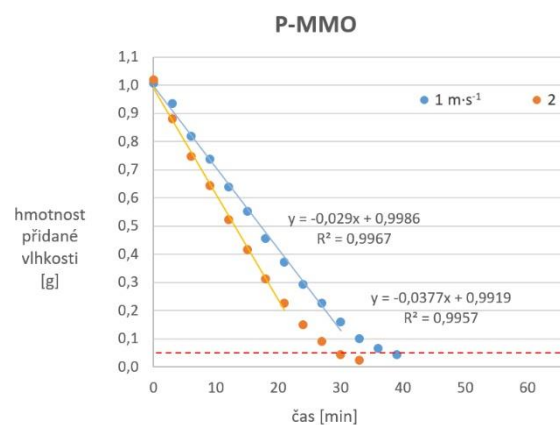
(b)



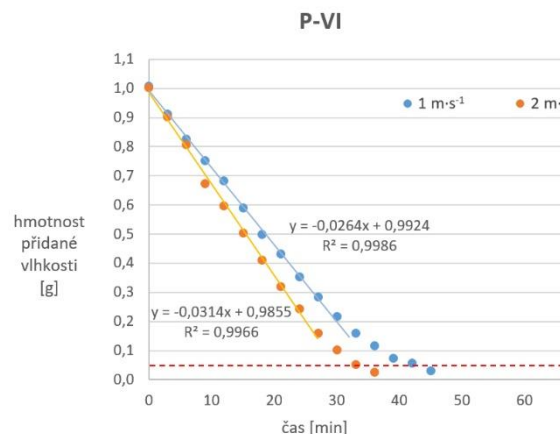
(c)



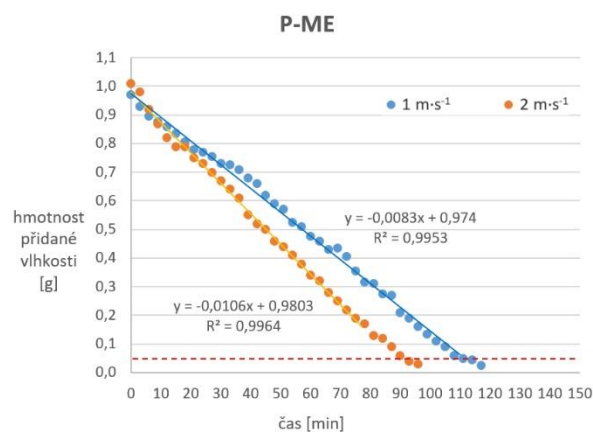
(d)



(e)

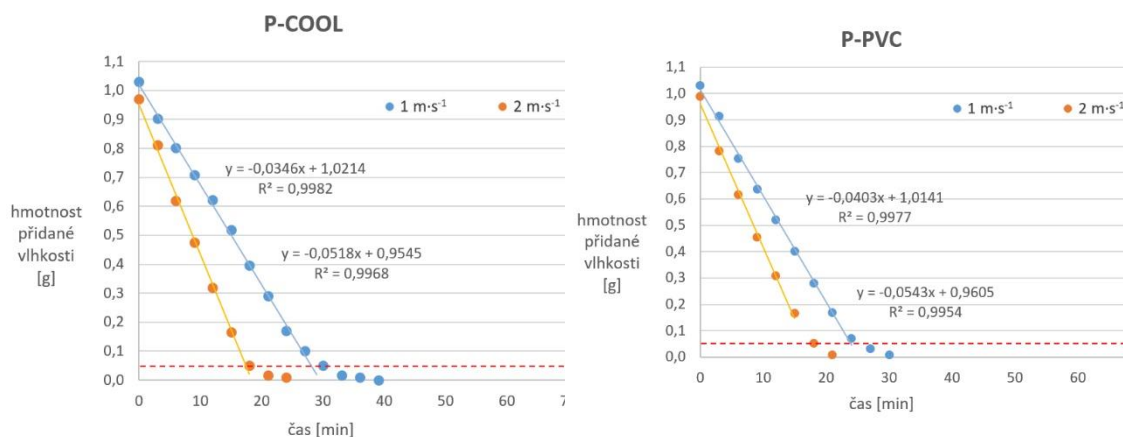


(f)



(g)

Obr. 39 Porovnání sušících křivek pro rychlosti proudění 1 a 2 m·s<sup>-1</sup> – obouliční vzorky  
(a) P-BA, (b) P-PE, (c) P-MO, (d) P-TE, (f) P-MMO, (f) P-VI, (g) P-ME

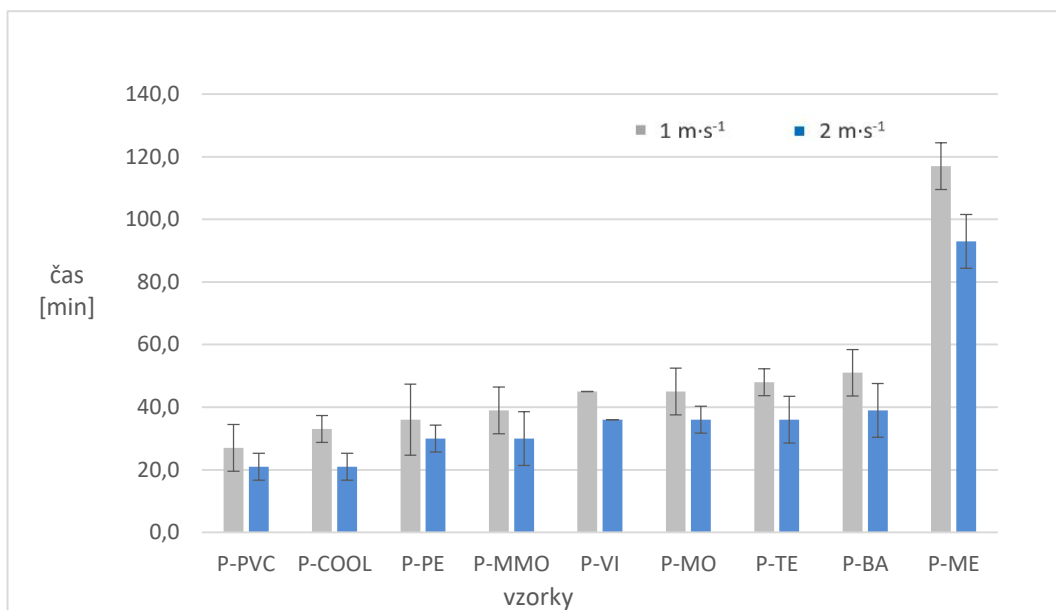


(a)

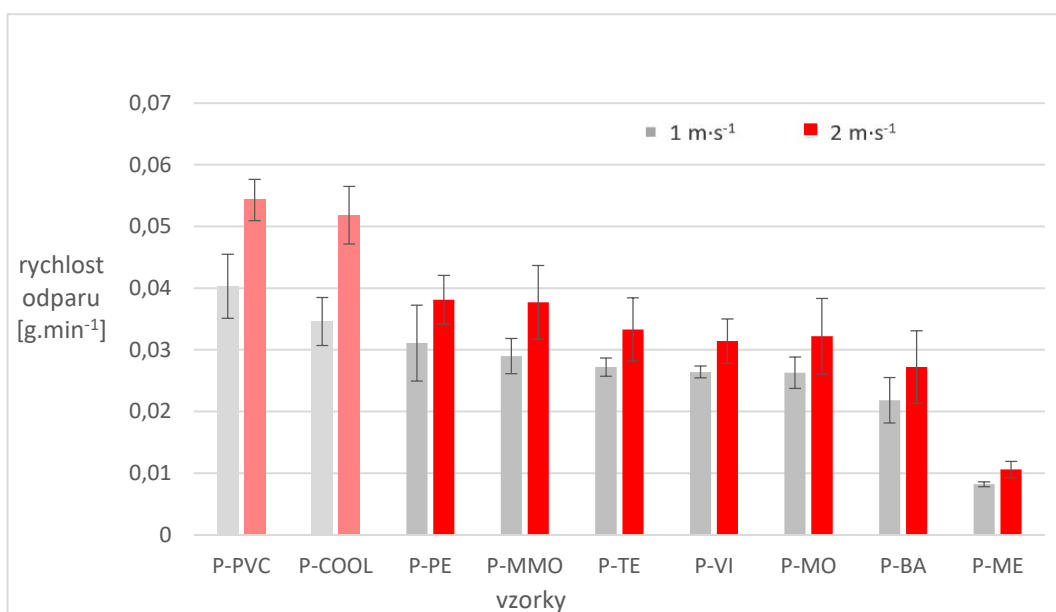
(b)

Obr. 40 Porovnání sušících křivek pro rychlosti proudění 1 a 2 m·s<sup>-1</sup> – jednolichní vzorky  
(a) P-COOL, (b) P-PVC

Jak je z grafů na obrázcích 39 a 40 zřejmé, se zvyšující se rychlostí ofukování stoupá rychlost sušení a zároveň klesá celková doba sušení vzorků. Celkové porovnání jednotlivých vzorků zobrazují grafy na obrázcích 41 a 42.



Obr. 41 Čas potřebný k odparu 1 gramu vlhkosti metodou B při různých rychlostech proudění



Obr. 42 Vliv rychlosti proudění na rychlost sušení

Nejdelsí dobu sušení a zároveň i nejnižší rychlost sušení v lineární části vykazoval pro obě rychlosti proudění vzorek P-ME, nejvyšší rychlost a zároveň i nejkratší doba sušení se projevila u vzorků z profilovaných vláken P-COOL a P-PVC. Statisticky významný rozdíl mezi oběma rychlostmi proudění vykazovaly vzorky P-PVC, P-COOL, P-MMO, P-VI a P-ME. U ostatních vzorků díky vyšší variabilitě naměřených dat dochází k překrývání 95% intervalů spolehlivosti pro střední hodnotu.

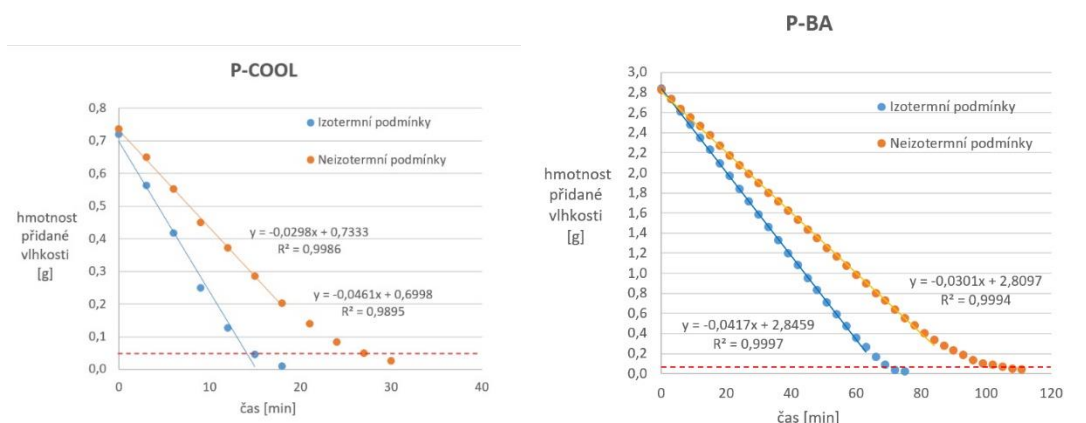
## 7.4 Vliv izotermních a neizotermních podmínek na rychlost sušení

V této části dizertace je proveden experiment, který potvrzuje vliv izotermních podmínek na rychlost a průběh sušení. Jedním z cílů dizertační práce bylo zajistit izotermní podmínky měření, aby byl zajištěn konstantní tlakový spád pro všechny měřené vzorky. Měření za izotermních podmínek se standardně využívá i u měření jiných vlastností, například paropropustnosti. Pokud sušení textilie neprobíhá při známé a kontrolované teplotě textilie, kde hnací silou je rozdíl parciálního tlaku nasycené vodní páry při stabilizované teplotě vlhké textilie a parciálního tlaku vodní páry v okolním sušícím prostředí, pak v důsledku vysokého výparného tepla vody teplota této textilie klesá. Tím ovšem klesá i parciální tlak nasycené vodní páry na povrchu vlhké textilie a zároveň i celková hnací síla. Protože doba sušení vlhké textilie v lineární části sušící křivky je úměrná hnací síle, může vysoušení volně uložené vlhké textilie do okamžiku, kdy se odpaří většina její volné vody trvat déle, jak lze pozorovat například ve studiích [82, 105].

Hodnota přestupu tepla při použití hliníkového žebra pro standardní klimatické podmínky v laboratoři byla spočítána v kapitole 6.2 a poté z ní byl vypočítán i vznikající maximální rozdíl teplot během procesu sušení. Tato hodnota byla následně spočítána i pro alternativní zkušební podmínky a ověřena praktickým experimentem. Naměřená data jsou součástí přílohy 1.

Pro účely následujícího experimentu byl vybrán vzorek z polyesterových profilovaných vláken označený jako P-COOL a vzorek z bavlněných vláken P-BA. Vzorky byly vlhčeny metodou A. Měření za izotermních podmínek probíhala standardním způsobem na hliníkovém žeburu, pro měření za neizotermních podmínek byly vypnuty spodní ventilátory a bylo použito žebro plastové, které má velmi nízkou tepelnou vodivost (cca  $0,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ). U každého vzorku byla provedena tři měření, v grafu jsou vyneseny pouze průměrné hodnoty v daných časových intervalech. Aktuální množství zbývající vlhkosti ve vzorku je opět vztaženo na plochu vzorku  $0,00728 \text{ m}^2$ . Naměřené sušící křivky lze pozorovat v grafech na obrázku 43. Rychlost sušení u vzorku P-COOL v lineární části dosahuje průměrně  $0,0298 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$  u neizotermních podmínek měření a  $0,0461 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$  pro měření za izotermních podmínek. Měření za izotermních podmínek je tedy 1,5 násobně rychlejší. U bavlněného vzorku s označením P-BA dosahuje rychlost sušení  $0,0301 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ , u měření za izotermních podmínek dosahuje hodnoty  $0,0417 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ . Sušení za izotermních podmínek je u vzorku P-BA 1,4 násobně rychlejší než při měření za podmínek neizotermních.

Naměřené hodnoty aktuální přidané vlhkosti ve vzorkách zobrazuje příloha 6. Z výsledků provedeného experimentu se potvrdil statisticky významný rozdíl na 5% hladině významnosti v rychlostech sušení při izotermních a neizotermních podmínkách. Pokud by tedy nebyl vzorek dohříván, došlo by k výraznému poklesu teploty. S poklesem teploty souvisí i menší tlakový spád, který rychlost sušení významně ovlivní.



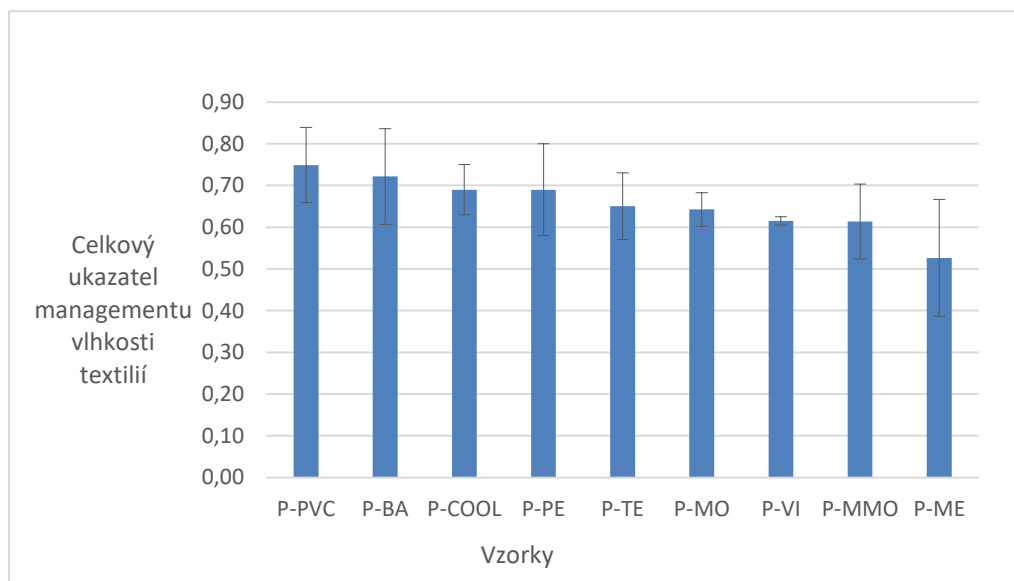
Obr. 43 Porovnání izotermních a neizotermních podmínek měření při  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Tento závěr potvrzuje i výpočet pro sušení ve volném stavu, kdy nejsou zajištěny izotermní podmínky měření a dochází tak k výraznému ochlazení textilie. V případě standardních klimatických podmínek ( $t_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $RH = 65 \%$ ) se textilie během sušení ochladí přibližně o  $4,8^\circ\text{C}$ , v případě alternativního zkušebního prostředí ( $t_a = 23 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $RH = 50 \%$ ) dokonce o  $7,8 \text{ }^\circ\text{C}$ . Výsledné teploty byly počítány iterační metodou z rovnice (73) a vychází z předpokladu, že je textilie perfektně zavlhčená vodou a vystavená nucené konvekci vzduchu o rychlosti  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Velikosti teplosměnných a vlhkosměnných ploch předpokládáme totožnou, proto je lze v rovnici pro porovnání tepelných toků zanedbat.

$$\beta_p \cdot \Delta p_p \cdot l_v = \alpha \cdot \Delta T \quad (73)$$

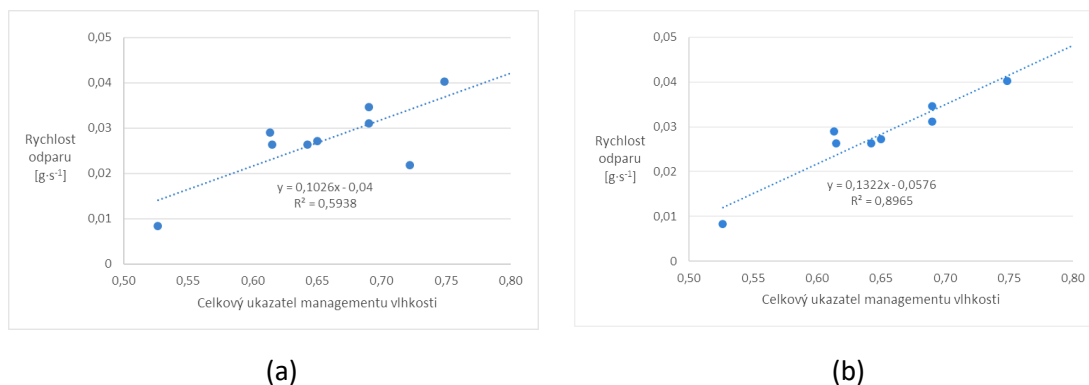
## 7.5 Porovnání výsledků z nového přístroje s naměřenými daty z přístroje MMT

V kapitole 7.2 byly prezentovány dva způsoby vlhčení vzorků – metoda A a B. U metody B je rychlost sušení ovlivněná především celkovou velikostí vlhkosměnné plochy, která závisí na schopnosti textilie šířit vlhkost v ploše. Jak již bylo zmíněno v teoretické části, přístroj, který se zabývá managementem vlhkosti se nazývá MMT a lze na něm hodnotit tzv. celkový ukazatel managementu vlhkosti. Tento ukazatel slouží pro vyjádření celkové schopnosti textilií rozvádět vlhkost a vychází z těchto naměřených údajů: savost spodní strany textilie, schopnost jednosměrného přenosu vlhkosti a pomocí kumulativní rychlost šíření vlhkosti. Následující graf na obrázku 44 zobrazuje celkový ukazatel managementu vlhkosti textilií pro jednotlivé vzorky. V příloze 8 jsou uvedeny průměrné hodnoty z 5 měření pro každý vzorek.



Obr. 44 Celkový ukazatel managementu vlhkosti

Jak je z grafu patrné, nejsou mezi naměřenými daty významné rozdíly, podle tabulky hodnocení uvedené v [75] lze celkový ukazatel managementu vlhkosti většiny vzorků označit za VELMI DOBRÝ (2. stupeň na 5 členné stupnici). Pouze vzorek P-ME vykazuje stupeň DOBRÝ (3. stupeň na 5 členné stupnici). Závislost celkového ukazatele managementu vlhkosti na rychlosti sušení ukazují grafy na obrázku 45.



Obr. 45 (a) vztah celkového managementu vlhkosti a rychlosti odparu u metody B pro všechny vzorky, (b) vztah celkového managementu vlhkosti a rychlosti odparu u metody B s vyloučením vzorku P-BA.

Graf (a) na obrázku 45 ilustruje závislost mezi rychlostí sušení u metody B a celkovým managementem vlhkosti pro všechny vzorky. Z grafu je patrné vybočující měření vzorku P-BA. Tento vzorek vykazoval významné šíření vlhkosti pouze v jednom směru, proto byla u něho celková vlhkosměnná plocha relativně malá. Avšak přístroj MMT není schopen vyhodnotit šíření vlhkosti pouze v jednom horizontálním směru. Pokud by byl přístroj schopen přesně zachytit velikost zavlhčené plochy, měla by se ve výsledcích projevit silná lineární závislost, jako je tomu v grafu (b), ve kterém již není vzorek P-BA zachycen.

Z naměřených dat je tedy patrné, že přístroj MMT není schopen přesně predikovat rychlost sušení pro všechny vzorky a je třeba pro hodnocení celkového managementu vlhkosti zahrnout i skutečně naměřenou rychlost sušení. Hodnocení managementu vlhkosti na přístroji MMT je tedy vhodné především u vzorků, kde se vlhkost šíří stejně ve směru řádku i sloupku u pletenin či útku a osnovy u tkanin. Pokud dochází k šíření vlhkosti pouze v jednom směru, není to přístroj MMT schopen odlišit. Směrové šíření vlhkosti u přístroje MMT považuje za nedostatečné i například studie Troynikova [107].

## 8 Vliv obsahu přidané vlhkosti v textiliích na termofyziologický komfort

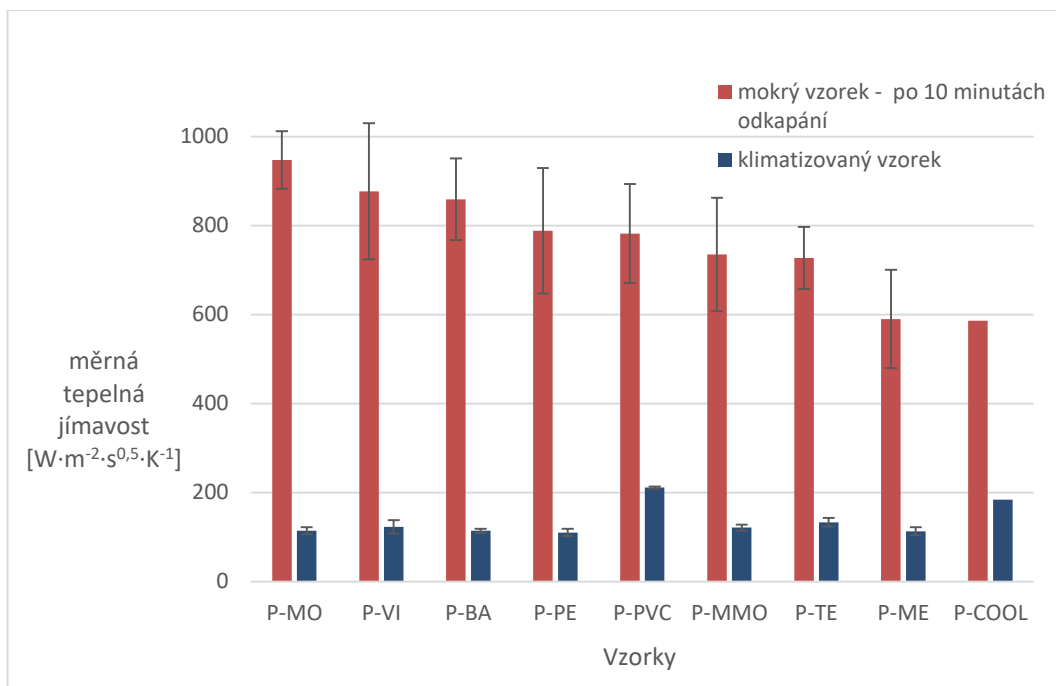
Vzhledem k zaměření celé dizertace je důležité u hodnocení doby sušení a sledování sušících křivek brát v potaz především tepelně kontaktní vjem uživatele, nebo-li jeho pocit komfortu ve vztahu k aktuálnímu množství přidané vlhkosti textilií. Množství vlhkosti v textiliích má zásadní vliv na termofyziologický komfort nositele. Velké množství vlhkosti způsobí nejen rychlý odvod tepla (ochlazení nositele), ale zároveň i nepříjemný pocit lepivosti či škrábavosti na pokožce.

Jak bylo popsáno v teoretické části, během sušení vlhkých textilií na těle nositele dochází k odpařování vlhkosti, při kterém se spotřebovává výparné teplo. V důsledku toho se tělo uživatele postupně ochlazuje. Lidský organismus tak musí vyvinout energii potřebnou na opětovné zahřátí. Pokud bychom se zabývali pouze zavlhčením oděvu v důsledku pocení, je v prvním okamžiku tento jev žádoucí. Mechanismus pocení spustí lidské tělo ve chvíli, kdy dochází ke zvýšení jeho tělesné teploty buď vlivem vysoké tělesné zátěže, vlivem nemoci nebo kvůli vyšší teplotě okolního prostředí. V tomto okamžiku je nutné tělesnou teplotu snížit, je tedy žádoucí intenzivní, avšak krátkodobý chladicí efekt, který je schopen vlhký oděv poskytnout. Ve většině případů by chlazení nemělo trvat dlouho, především proto, aby naopak nedošlo k nachlazení uživatele. Proto jsou kladeny na oděvy (především prádlo) vysoké nároky v oblasti rychlosti sušení. Ideální textilie by v běžných klimatických podmínkách měla ve většině případů zajistit krátkodobý intenzivní chladicí efekt (samozřejmě existují i výjimky, např. v oblastech s nízkou relativní vlhkostí vzduchu a vysokou teplotou, nebo při vysokém fyzickém výkonu, u kterého nedochází ke snížení intenzity námahy, atd...).

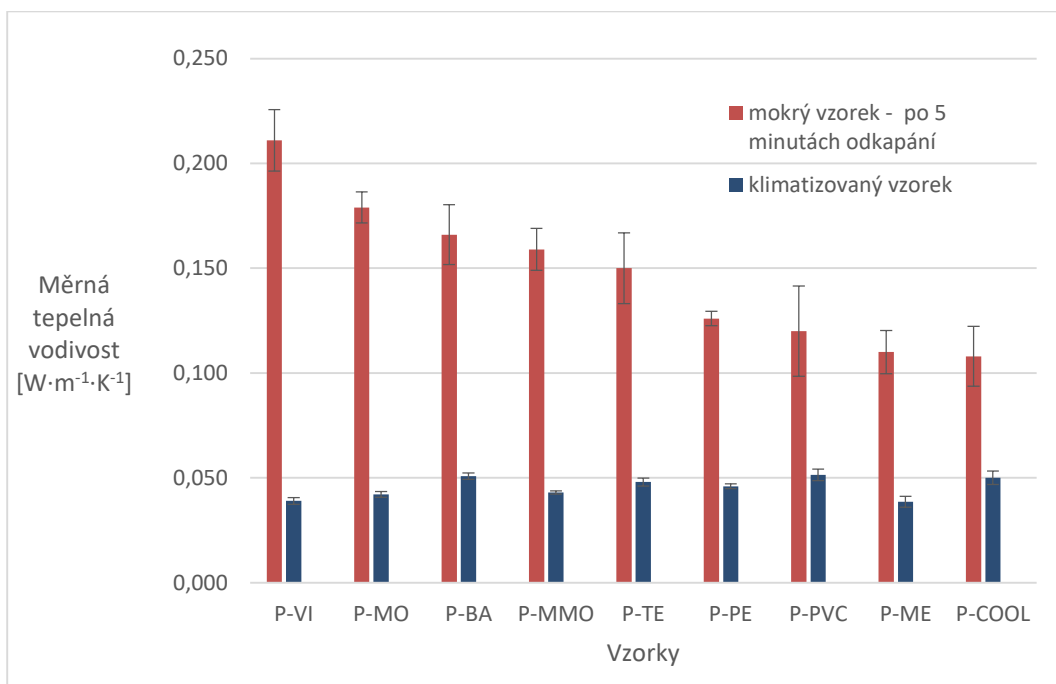
Termofyziologický komfort oblečeného člověka významně ovlivňují především tyto vlastnosti textilií: měrná tepelná jímavost, měrná tepelná vodivost (a s tím související tepelný odpor), paropropustnost a prodyšnost textilií. Všechny tyto vlastnosti se u navlhčené textilie mění [74]. Z uvedených vlastností nejlépe charakterizuje pocit sucha či vlhka tzv. měrná tepelná jímavost, která hodnotí tepelný omak [10]. Pocit tepla velmi úzce souvisí i s obsahem vlhkosti ve vzorku, vlhký vzorek se jeví jako chladnější než vzorek suchý. Obecně lze říci, že chladnější omak poskytují textilie z přírodních vláken, naopak textilie ze syntetických vláken mají většinou omak teplejší [10].

Následující grafy na obrázcích 46 a 47 porovnávají hodnoty měrné tepelné jímavosti a měrné tepelné vodivosti vzorku v klimatizovaném stavu a vzorku zavlhčeného (po 10 minutách odkapání na své podložce). Data byla naměřena na přístroji Alambeta při přítlaku 200 kPa, který se využívá pro hodnocení tepelných charakteristik textilií.





Obr. 46 Měrná tepelná jímavost vzorků v klimatizovaném stavu a po zavlhčení



Obr. 47 Měrná tepelná vodivost vzorků v klimatizovaném stavu a po zavlhčení

Z naměřených dat je na první pohled patrný významný vliv vlhkosti na termofyziologický komfort nositele.

Naměřené hodnoty tepelné jímavosti i měrné tepelné vodivosti v klimatizovaném stavu a ve stavu po zavlhčení pomocí metody A vykazují statisticky významné rozdíly. Rozdílné hodnoty jsou způsobeny nejen odlišným materiálovým složením, ale i rozdílným obsahem retenční vlhkosti ve své struktuře, jak je patrné z grafu na obrázku 32. Kromě měrné tepelné jímavosti, měrné tepelné vodivosti a (s tím i souvisejícího tepelného odporu) ovlivní zavlhčení vzorků také hodnoty jejich paropropustnosti. Tento fakt potvrzují i autoři článku [74].

Hodnoty měrné tepelné jímavosti se u všech zavlhčených textilií pohybovali v intervalu  $580\text{--}950 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{0.5}\cdot\text{K}^{-1}$ , což odpovídá textiliím ve vlhkém stavu dle [10, 74, 133]. Hes a kol. ve své publikaci uvádí, že měrná tepelná jímavost u textilií zavlhčených potem může přesáhnout v některých případech i hodnoty  $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{0.5}\cdot\text{K}^{-1}$ . Měrnou tepelnou jímavost vzorků lze do určité míry ovlivnit i vhodnou povrchovou úpravou. Pokud se zaměříme na hodnoty měrné tepelné vodivosti, i zde je patrný významný vliv vlhkosti. Měrná tepelná vodivost vody je mnohonásobně vyšší než tepelná vodivost vzduchu, proto je vysoký obsah vody z hlediska odvodu tepla v oděvu v běžných klimatických podmínkách v klidovém režimu či mírné fyzické zátěži nositele nežádoucí.

## 8.1 Subjektivní hodnocení “suchosti” či “vlhkosti” zavlhčené textilie

Jak již bylo několikrát zmíněno, hodnocení komfortních vlastností je ovlivněno isubjektivními pocity samotného uživatele. To se týká nejen pocitu tepla, chladu, omaku, ale i rozdílného vnímání množství přidané vlhkosti v textiliích. Z tohoto důvodu následující kapitola porovnává naměřené hodnoty množství přidané vlhkosti v průběhu sušení a hodnoty měrné tepelné jímavosti i s pocity vnímání suchosti či vlhkosti textilií hodnotiteli. Cílem bylo zjistit, jakým způsobem je vhodné hodnotit proces sušení s ohledem na termofyziologický komfort uživatele. Zda lze hodnotit pouze celkovou dobu sušení, nebo naopak klást při hodnocení sušících křivek důraz na rychlost sušení v lineární části.

### Příprava vzorků:

Z každého materiálu byl vystřížen vzorek o rozměrech  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Všechny vzorky byly vyprány a zbaveny nečistot v ultrazvukové čističce. Následně byly ponechány po dobu 24 hodin v klimatických podmínkách laboratoře při teplotě  $23 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a relativní vlhkosti vzduchu 50 %. Tyto klimatické podmínky byly po celou dobu experimentu totožné, stejně jako v předchozích experimentech. Vybraní hodnotitelé byli ve věku mezi 35–65 lety. Vzorky byly navlhčeny metodou A a po 10 minutovém odkapání byly zváženy. Poté byly v pravidelných 15 minutových intervalech přikládány na dobu 5 sekund na předloktí hodnotitele a následně převáženy. V čase mezi hodnocením a vážením byly vzorky ponechány k volnému schnutí na stole v klimatických podmínkách laboratoře. Hodnocení probíhalo na stupnici 1–5. Jednotlivé stupně pocitu vlhka či sucha popisuje tabulka 11. Na základě hodnocení uživatelů byl zvolen jako hraniční stupeň 2. Hodnoty nižší nebo rovny stupni 2 byly brány jako komfortní.

Tab. 11 Hodnoty „subjektivního vnímání vlhkosti ve vzorku“ na konci lineární části sušící křivky

Hodnotitel/ vzorek	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$M_e$	n dovrvar	přidaná vlhkost ve vzorku [%]	přidaná vlhkost ve vzorku [g]	přidaná vlhkost vztažená na m <sup>2</sup> [g·m <sup>-2</sup> ]	měrná tepelná jímavost [W·m <sup>-2</sup> ·s <sup>0,5</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
P-BA	2	1,5	1,5	3	1,5	1,5	1	1	3	1,5	0,37	18	0,26	36	372
P-MO	2	1,5	2	3	2	1,5	1,5	1	3	2	0,35	21	0,25	34	329
P-TE	2	2	2	4	2	2	2	2	2,5	2	0,14	20	0,27	37	369
P- MMO	1,5	1,5	2,5	2,5	2	2	2	1,5	2,5	2	0,22	20	0,25	34	341
P-VI	1,5	2	2	3	2	2	1,5	1,5	3	2	0,2	24	0,28	38	321
P-ME	1,5	1	2	3	2	2	1	1	2	2	0,28	21	0,42	58	272
P-PE	1	1	1	2	1	2	1	1	2	1	0,22	7	0,1	14	301
P-COOL	1	1	1,5	1	1	1,5	2	1	2	1	0,21	4	0,05	7	342
P-PVC	1,5	1	1	1	1	2	2	1	2,5	1	0,28	8	0,11	15	338

V okamžiku určení stupně suchosti hodnotitelem byla zaznamenána aktuální hmotnost vzorku. Následně bylo pro lepší porovnání mezi jednotlivými vzorky určeno procentuální zavlhčení vzorku jako množství přidané vlhkosti vztažené k hmotnosti vzorku v klimatizovaném stavu. Jednotlivé hodnocení vždy probíhalo maximálně se dvěma hodnotiteli, aby nedošlo k ohřevu vzorků kontaktem s ostatními hodnotiteli. Z tohoto důvodu i hodnoty zavlhčení v daném okamžiku hodnocení nejsou u všech hodnotitelů totožné. Pořadí přikládání vzorků bylo zvoleno náhodně. Hodnocení stejného vzorku probíhalo mezi oběma uživateli nejdříve po 15 sekundách.

Během experimentu se projevil problém s pětistupňovou škálou, pro většinu hodnotitelů byla nedostačující. Proto byla rozšířena o tzv. půl stupně, které vždy označují tzv. mezistupeň hodnocení.

Jednotlivá hodnocení hodnotitelů byla vždy přiřazena k procentuálnímu vyjádření vlhkosti ve vzorku s přesností  $\pm 2$  % (s důrazem na zavlhčení po okapání vzorku, 100% a 50% zavlhčení, zavlhčení v kritickém bodě a zavlhčení na konci sušení). Přehled všech hodnocení je uveden v příloze 9. V případě, že některá hodnocení při daném zavlhčení chyběla, byla doplněna podle nejbližších dvou hodnot. Z vyhodnocených dat byl vybrán bod, který odpovídal zavlhčení vzorků na konci lineární části sušících křivek, jak bylo popsáno v kapitole 7.2. Tento bod na sušících křivkách byl zvolen především z důvodu, aby se ověřil vliv vlhké textilie na termofyziologický komfort uživatele v okamžiku, kdy dochází ke zpomalení sušícího procesu a snižuje se intenzita chladicího toku.

Z hodnot získaných od 9 hodnotitelů byl určen výsledný stupeň pocitu suchosti v daném bodě a také byla vyhodnocena shoda mezi hodnotiteli z hlediska vnímání pocitu vlhka či sucha při takto zavlhčených vzorcích pomocí variability mediánu ordinální škály [133].

Z hodnot mediánů ze získaných stupňů suchosti od všech hodnotitelů (v kritickém bodě) můžeme u všech vzorků konstatovat, že na konci lineární části sušících křivek lze považovat příslušné množství vlhkosti v textiliích z hlediska vnímání pocitu sucha či vlhka stále za komfortní. U vzorků z přírodních vláken se hodnota zavlhčení na konci lineární části sušení pohybuje okolo 18–24 %, u vzorků z vláken syntetických díky jejich nízké nebo téměř nulové navlhavosti činí pouze 4–8 %. V tabulce jsou uvedeny i absolutní hodnoty vlhkosti pro daný vzorek aby je bylo možné vztáhnout k naměřeným sušícím křivkám.

V tabulce 11 jsou kromě subjektivního hodnocení suchosti od všech hodnotitelů uvedeny také hodnoty měrné tepelné jímavosti. V odborné literatuře [134] lze nalézt tabulku s hodnotami tepelné jímavosti různých typů suchých, vlhkých či zcela mokrých textiliích. Jak uvádí Hes a kol. ve své publikaci [10], praktické hodnoty suchých textilií se pohybují v rozmezí  $20\text{--}400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{0.5}\cdot\text{K}^{-1}$ . Naměřené hodnoty měrné tepelné jímavosti se u všech vzorků pohybují v rozmezí od  $272 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{0.5}\cdot\text{K}^{-1}$  (vzorek P-ME) do  $369 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{0.5}\cdot\text{K}^{-1}$  (vzorek P-TE), tyto hodnoty měrné tepelné jímavosti potvrzují suchý a teplý omak textile.

Ze získaných hodnot uvedených v příloze 9 lze vyhodnotit subjektivní vnímání termofyziologického komfortu i při dalších úrovních zavlhčení testovaných textilií získat tak ucelený přehled o vnímání pocitů sucha či vlhka s ohledem na procentuální zavlhčení dané textile. Co se týká určení přesného konce sušení, lze konstatovat, že u všech vzorků byla hodnota mediánu stupně suchosti na stupni 1 v oblasti minimálně 4% zavlhčení. U vzorku o ploše odpovídající velikosti měřicího členu  $0,00728 \text{ m}^2$  a plošné hmotnosti  $162 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  (vzorek s nejnižší plošnou hmotností P-VI) odpovídá 4% zavlhčení absolutní hodnota hmotnosti vlhkosti 0,05 g. Tato hodnota odpovídá i přesnosti zde používaných vah, pokud tedy klesne hodnota zbývajících vlhkosti ve vzorku pod tuto mez, lze vzorky považovat za suché i při nižší plošné hmotnosti. Z výsledků této kapitoly lze tedy usuzovat, že rychlost sušení v lineární části je pro hodnocení sušících křivek z hlediska termofyziologického komfortu zásadní.

## ZÁVĚR

Hlavním cílem dizertační práce bylo vytvořit zařízení umožňující zaznamenávat sušící křivky textilií za přesně definovaných podmínek. Po zhodnocení a porovnání dostupných metodik bylo ověřeno, že je nutné zahrnout jako důležitý parametr ovlivňující rychlost sušení také přesnost ofukování vzorku ustáleným a přesně definovaným proudem vzduchu. Z toho důvodu byl vytvořen zcela nový přístroj, který umožňuje regulovat rychlost proudění nad měřeným vzorkem v rozsahu  $1\text{--}5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a udrží během měření téměř izotermní podmínky. Podmínky byly ověřeny výpočtem jednotlivých tepelných toků během měření vlhké textilie a také praktickým experimentem. V současné době je podána patentová přihláška.

Nejpřesnější způsob, který je schopen zachytit aktuální množství vlhkosti v textiliích, je způsob gravimetrický. Tento způsob používají i některé dostupné normy [73, 78, 79]. U těchto norem ale chybí přesně definované proudění nad měřeným vzorkem, měření je proto značně zdlouhavé. Dalším problémem je změna relativní vlhkosti vzduchu v uzavřeném prostoru nad měřeným vzorkem, která způsobí snížení rozdílu parciálních tlaků a s tím i související chybu měření. Z tohoto důvodu nový přístroj zajišťuje odvod vlhkého vzduchu pomocí přesně definovaného proudění nad vzorkem. Po otestování nového přístroje bylo nutné odstranit odchylku, vznikající dlouhodobým zatížením vah ve spojení s prouděním nad měřeným vzorkem. Nový přístroj byl proto v poslední fázi testování upraven a rozšířen o zvedací mechanismus včetně řízení PLC jednotkou. PLC jednotka v pravidelných intervalech zastavuje proudění a zvedá měřicí člen.

Po této úpravě byl záznam hmotnosti stanoven na interval 3 minuty, hodnota aktuální hmotnosti již nebyla zatížena chybou. Následně byla ověřena opakovatelnost měření pomocí homogenity směrnic, které předcházelo testování shody rozptylů. Použitý Bartlettův test potvrdil ve všech realizovaných experimentech konstantní rozptyl na 5% hladině významnosti, následující test pro porovnání homogenity směrnic ukázal, že výsledné regresní linie při pokusech s rychlostí proudění 2, 3 a  $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  jsou rovnoběžné taktéž na 5% hladině významnosti.

Všechna testování následně probíhala při alternativních zkušebních podmínkách ( $t_a = 23\text{ °C}$  a  $RH = 50\%$ ), jak připouští norma [121]. Pro splnění dílčích cílů byl vybrán soubor zátažných pletenin z přízí o stejných jemnostech, avšak různého materiálového složení. Tyto pleteniny se používají standardně na výrobu spodního prádla. Vzhledem k uvedeným nedostatkům stávajících metodik a poznatků z odborných studií byly stanoveny tyto dílčí cíle: porovnání metod vlhčení vzorků, vyhodnocení vlivu rychlosti proudění vzduchu nad měřenými vzorky, porovnání izotermních a neizotermních podmínek vzhledem k rychlosti sušení, porovnání s hodnotami z přístroje MMT a zhodnocení vlivu obsahu přidané vlhkosti v textiliích na termofyziologický komfort včetně subjektivního hodnocení suchosti či vlhkosti textilie.

Kvůli nejednotnosti způsobů vlhčení textilií uvedených ve standardních metodikách byly zvoleny dva hlavní způsoby vlhčení vzorků. První metoda vlhčení označená jako metoda A používala ponoření celého vzorku do destilované vody.

Počáteční množství vlhkosti v textiliích tak bylo pro jednotlivé vzorky odlišné a odráželo retenční schopnost (schopnost zadržet vlhkost ve své struktuře) dané textilie. Tato metoda lépe ilustrovala případ, kdy dochází k úplnému propocení první vrstvy. Oproti tomu druhý způsob (metoda B) reflektuje případ, kdy dochází pouze k lokálnímu pocení a vlhkost má možnost rozšířit se především v ploše textilie.

Na tomto principu fungují v podstatě i tzv. funkční materiály. Tyto materiály jsou vyrobené většinou z profilovaných syntetických vláken, které zajistí perfektní rozvod vlhkosti v ploše. Vlhkosměnná efektivní plocha je u těchto pletenin rozsáhlá, protože díky intenzivnímu vedení vlhkosti v mikrokapilárách dochází k pohybu vlhkosti nejen v rovině, ale i ve směru tloušťky textilie. Pro tuto metodu bylo stanoveno přesné množství vlhkosti, které bylo aplikováno pipetou na tři místa textilie. Následně bylo počkáno 15 minut, než se vlhkost vsákne do struktury vzorku. Po tuto dobu byl vzorek zakryt, aby nedocházelo k odparu vlhkosti.

Pro porovnání sušících křivek lze využít dva způsoby. Jedním z nich je celková doba sušení, která se standardně hodnotí i v ostatních metodikách. Určení koncového bodu sušení však není u všech metod totožné a je předmětem zkoumání i u ostatních autorů. V této práci byl tedy koncový bod zvolen nejprve s ohledem na přesnost měřícího přístroje, která vychází z přesnosti použitých vah a činí  $\pm 0,05$  g. Následně byla tato hodnota ověřena i v experimentu popsáném v kapitole osmé, která potvrdila, že z hlediska termofyziologického komfortu je toto množství přidané vlhkosti v textiliích již zanedbatelné a textilie lze považovat za suché.

Při hodnocení celkové doby sušení se u metody A projevila především rozdílná počáteční absorpce vlhkosti vzorků. Nejdelší čas sušení vykazoval vzorek z vlněných vláken P-ME i přesto, že absorboval poměrně málo vlhkosti oproti třeba vzorku P-BA a P-VI. Oproti tomu vzorky P-PVC a P-COOL vykazují velmi krátký celkový čas sušení, což je dáno především malou počáteční absorpcí a zároveň i jejich nízkou navlhavostí. Mezi ostatními vzorky není statisticky významný rozdíl v celkové době sušení.

U metody B je pro všechny vzorky počáteční množství vlhkosti stejné, vzorky se však liší velikostí zavlhčené plochy dle jejich schopnosti šířit vlhkost v ploše. Celková doba sušení je tedy ovlivněna především velikostí zavlhčené plochy. Nejdelší čas sušení opět vykazuje vzorek P-ME, nejkratší celkový čas vzorek P-PVC. Ostatní vzorky nevykazují v celkové době sušení mezi sebou statisticky významný rozdíl.

Celkový čas sušení je tedy ovlivněn především počátečním množstvím vlhkosti. Pro hodnocení termofyziologického komfortu je důležitý krátkodobý, avšak intenzivní chladicí efekt. Intenzitu tohoto efektu lze hodnotit právě pomocí rychlosti sušení v lineární části sušících křivek, kdy dochází k odparu volné vlhkosti ze struktury textilie.

Tento způsob hodnocení procesu sušení používali například Yanilmaz a kol. [65] či Chau a kol. [111]. Tito autoři vyzdvihují význam tohoto parametru. Okamžik, kdy dochází ke zpomalení tohoto děje, je definován dle odborné literatury jako kritický bod a bylo třeba jej přesněji určit na naměřených křivkách určením tzv. bodu zlomu pomocí statistického programu R. Z tohoto důvodu byl zároveň s analýzou naměřených sušících křivek proveden experiment popsáný v kapitole 8. Cílem tohoto experimentu bylo zjistit, jakým způsobem ovlivňuje množství přidané vlhkosti na konci lineární části komfortní vjem uživatele podle jeho pocitu vnímání vlhka či sucha. I přes to, že v tomto bodě u některých textilií (především z přírodních vláken) uživatelé vnímali mírný pocit vlhka, nepovažovali již tento pocit za významný z hlediska hodnocení termofyziologického komfortu. Výsledný vjem tedy označili za komfortní. Tímto způsobem tedy byla ověřena možnost a význam hodnocení sušících charakteristik jednotlivých textilií pomocí rychlosti sušení v lineární části sušící křivky. V lineární části každé sušící křivky jsou data proloženy regresní přímkou, koeficienty determinace u všech naměřených dat byly vyšší než 0,99. Tato hodnota potvrzuje vhodnost daného lineárního modelu.

Při porovnání rychlostí mezi jednotlivými vzorky bylo ověřeno, že u metody A nejsou rozdíly mezi jednotlivými vzorky tak výrazné (pohybují se v intervalu od 0,0334 – 0,0475 g·min<sup>-1</sup>) jako u metody B, kde je rozpětí naměřených rychlostí odparu vlhkosti z měřeného vzorku mnohem širší (0,0083–0,0403 g·min<sup>-1</sup>). Metoda A tedy lépe reprezentuje případ, kdy dochází k úplnému propocení první oděvní vrstvy a absorbovaný pot se nemůže rozvést dále do plochy. Skutečná efektivní vlhkosměnná plocha je v tomto případě ovlivněna pouze strukturou textilií. Velikost této plochy lze odhadnout pomocí rovnice uvedené v kapitole 7.2. Tato rovnice vychází z odparu vlhkosti z volné hladiny na základě teorie o přenosu hmoty při daných klimatických podmínkách.

Metoda B naopak přesněji odráží způsob zavlhčení textilie potem na lidském těle při mírném až středním stupni pocení, kdy nedochází k úplnému zavlhčení textilie a může se zde pozitivně projevit schopnost textilie šířit vlhkost v ploše. U této metody je tedy velikost skutečné efektivní vlhkosměnné plochy ovlivněna nejen strukturou, ale především i schopností textilií šířit vlhkost ve všech směrech. To je patrné především u vzorků ze syntetických vláken (P-PVC, P-COOL, P-PE), kde vzorek P-PVC vykazoval téměř nulový rozdíl v naměřených rychlostech sušení pro obě metody.

U vzorku P-PE byla rychlost sušení v lineární části u metody A rychlejší o 26 % a u vzorku P-COOL o 33 %. U přírodních vláken naopak převažují adhezní síly nad kapilárními, proto je pohyb vlhkosti nižší, dochází tedy k menšímu šíření vlhkosti v ploše. Například u vzorku z vlněných vláken P-ME byl rozdíl dokonce 300 %. Metoda B tedy ve většině případů lépe odráží skutečný případ zavlhčení textilie potem při střední a mírné zátěži a jsou u ní patrné větší rozdíly mezi naměřenými daty. Při porovnání rychlostí u metody B se tedy daleko lépe projeví rozdíly mezi jednotlivými textiliemi z hlediska schopnosti šířit vlhkost v ploše.

Rozdíly mezi jednotlivými vzorky jsou z hlediska komfortu uživatele stěžejní právě pro volbu vhodného materiálu na první oděvní vrstvu s ohledem na očekávaný stupeň fyzické aktivity a s tím i spojený předpokládaný stupeň pocení vzhledem k aktuálním klimatickým podmínkám.

Dalším cílem práce bylo vyhodnotit i vliv rychlosti proudění nad měřeným vzorkem. Pro tento experiment byly vybrány dvě rychlosti ( $1$  a  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Statisticky významný rozdíl mezi oběma rychlostmi proudění vykazovaly vzorky P-PVC, P-COOL, P-MMO, P-VI a P-ME. U ostatních vzorků díky vyšší variabilitě naměřených dat dochází k překrývání 95% intervalů spolehlivosti pro střední hodnotu, v tomto případě by bylo vhodné provést více měření.

V další části byl naplánován experiment, který porovnával sušicí křivky vzorků P-BA a P-COOL při nastavených izotermních podmínkách a při podmínkách neizotermních. Byl potvrzen významný vliv na rychlost měření při zajištění izotermních podmínek měření. U obou vzorků je rychlost sušení při zajištění izotermních podmínek vyšší o 40–50%. Pokud by tedy nebyl vzorek dohříván, došlo by k výraznému poklesu teploty. S poklesem teploty souvisí i menší tlakový spád, který sníží rychlost sušení.

Poslední část sedmé kapitoly porovnává výsledky ze standardního přístroje MMT s rychlostmi sušení naměřenými na novém přístroji metodou B. Z naměřených dat je patrné, že přístroj MMT není schopen přesně predikovat u všech vzorků rychlost sušení na základě velikosti zavlhčené plochy. Respektive hodnocení managementu vlhkosti na přístroji MMT je vhodné především u vzorků, kde se vlhkost šíří stejně ve směru řádku i sloupku či útku a osnovy. V tomto případě je přístroj MMT schopen relativně dobře předpovědět i rychlost sušení. Pokud dochází k šíření pouze v jednom směru, není to tento přístroj schopen odlišit. Směrové šíření vlhkosti považuje u tohoto přístroje za nedostatečné i například studie autorů Troynikov a kol. [107].

Poslední experimentální kapitola dizertace byla věnována vztahu mezi množstvím přidané vlhkosti v textiliích a vnímáním termofyziologického komfortu. Nejprve byl ověřen vliv přidané vlhkosti na měrnou tepelnou jímavost, která charakterizuje v podstatě tepelný omak a měrnou tepelnou vodivost v případě úplného zavlhčení vzorků. Následně byly tyto hodnoty porovnány s hodnotami naměřenými u vzorků v klimatizovaném stavu. U naměřených dat se u všech vzorků potvrdil významný vliv přidané vlhkosti na tyto vlastnosti. Následoval experiment, který porovnával množství zbývající přidané vlhkosti v textiliích během procesu sušení s hodnotami měrné tepelné jímavosti a subjektivním hodnocením uživatelů. Celý proces je zaznamenán v příloze 9. Jako stěžejní byl vybrán tzv. kritický bod na konci lineární části. V tomto bodě klesá intenzita chladícího toku, proto bylo nutné ověřit skutečný stav zavlhčené textilie, její tzv. suchost či vlhkost.

Z naměřených hodnot měrné tepelné jímavosti lze u všech vzorků předpokládat v kritickém bodě již suchý omak, jak je uvedeno například ve studii [134]. Z výsledků subjektivního hodnocení jednotlivých probandů lze na základě určení mediánové hodnoty predikovat podobný výsledek.



Resp. z mediánů získaných stupňů suchosti od všech hodnotitelů můžeme u všech vzorků konstatovat, že na konci lineární části sušících křivek lze považovat příslušné množství vlhkosti v textilií z hlediska vnímání pocitu sucha či vlhka za komfortní.

U vzorků z přírodních vláken se hodnota zavlhčení na konci lineární části sušení pohybovala okolo 18–24 %, u vzorků z vláken syntetických díky jejich nízké nebo téměř nulové navlhavosti činila pouze 4–8 %. Na tuto část práce by bylo vhodné navázat dalším výzkumem, zaměřit se na širší oblast textilií, případně otestovat i další vlastnosti při různém zavlhčení, které souvisí s termofyziologickým komfortem, jako je například paropropustnost či prodyšnost.

V této práci byly otestovány především textilie, které se standardně používají na první oděvní vrstvu. Z výsledků v dílčích kapitolách této práce vyplývá, že při úplném zavlhčení textilie potom jsou rozdíly mezi jednotlivými materiály mnohem nižší, než je tomu v případě částečného pocení, kdy má vlhkost prostor rozvést se v ploše. V tomto případě se dostávají do popředí textilie z profilovaných vláken (zde například vzorek P-PVC a P-COOL). Na tomto principu funguje i tzv. funkční prádlo. V případě úplného zavlhčení potom je také žádoucí vyšší retenční schopnost textilie, aby kapalný pot nezůstával na pokožce pod oděvem.

Z hlediska komplexního zhodnocení sušících charakteristik je tedy vhodné testovat sušící křivky oběma způsoby vlhčení, které nový přístroj umožňuje. Zajištění izotermních podmínek měření pak celé testování významně urychlí. Výsledky práce potvrzují, že nové měřicí zařízení včetně otestovaného způsobu hodnocení sušících křivek je schopné poskytovat přesné výsledky pro hodnocení sušících křivek jednotlivých textilií za běžných klimatických podmínek včetně nastavení rychlosti ustáleného proudu vzduchu přímo nad měřeným vzorkem.

Další výzkum v této oblasti by bylo vhodné zaměřit i na další textilní struktury, především složitější pletářské vazby, různě profilovaná vlákna či kombinace různých vláken v přízi. Z naměřených výsledků by pak bylo možné navrhnout i nové textilní struktury, které umožní velmi rychlý proces sušení i při intenzivním pocení. Současní výrobci textilií pro spodní oděvní vrstvu se zaměřují především na rychlý rozvod vlhkosti v ploše, avšak neřeší již skutečnou velikost efektivní vlhkosměnné plochy. V případě extrémní zátěže nebo vysoké okolní teploty však může dojít k úplnému zalití textilie potom a schopnost textilií rozvést vlhkost v ploše se v tomto případě nemůže pozitivně projevit.

V okamžiku úplného zavlhčení textilie je velikost efektivní vlhkosměnné plochy ovlivněna především vlastní strukturou textilie a bylo by vhodné této oblasti věnovat samostatný výzkum. Dle poznatků z odborných studií je bohužel tato oblast velmi málo prozkoumaná, pravděpodobně i z důvodu nedostačujících současných metodik. Nový přístroj ale umožňuje hodnotit rychlost sušení i u textilií, které jsou zcela zavlhčené, za přesně definovaných podmínek. Lze na něm tedy provést další výzkum se zaměřením na tuto oblast.

Jako další možnost kam směřovat výzkum v této oblasti se nabízí i ověření pocitu subjektivního vnímání vlhkosti v textiliích na širší skupině hodnotitelů a případně porovnat výsledné hodnoty i s dalšími termofyziologickými vlastnostmi (například paropropustností v zavlhčeném stavu).

## Seznam použité literatury

- [1] BIRD, R. B., W. E. STEWART a E. N. LIGHTFOOT. *Přenosové jevy*. Praha: Academia, 1968.
- [2] BARTÁK, M. *Úvod do přenosových jevů pro Inteligentní budovy* [on-line]. Praha: České vysoké učení technické, 2010 [cit. 2015-03-20].  
Dostupné z: <https://docplayer.cz/33812217-Uvod-do-prenosovych-jevu-pro-inteligentni-budovy.html>
- [3] HEMZAL, K. a J. CHYSKÝ. *Přenosové jevy v technice prostředí*. Praha: České vysoké učení technické, 1983.
- [4] KOLAT, Pavel. *Přenos tepla a hmoty*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 1986.
- [5] LIENHARD, J. H. *A Heat Transfer Textbook*. 3. vyd. Cambridge: Phlogiston Press, 2003. ISBN-10 0971383529, ISBN-13 978-0971383524
- [6] JAKOB, M. a S. P. KEZIOS. *Heat Transfer*. New York: Wiley, 1949.
- [7] ECKERT, E. R. G. a R. M. DRAKE. *Heat and Mass Transfer*. 2. vyd. New York: McGrawHill Book Company, 1957. ISBN 978-0070189249.
- [8] PETŘÍKOVÁ, M. *Sdílení tepla*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008.
- [9] SCHLICHTING, H. *Boundary Layer Theory*. 6. vyd. New York: McGrawHill Book Company, 1968.
- [10] HES, L. a P. SLUKA. *Úvod do komfortu textilií*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005. ISBN 80-7083-926-0.
- [11] BROŽ, J., V. ROSKOVEC a M. VALOUCH. *Fyzikální a matematické tabulky*. Praha: SNTL, 1980.
- [12] PLANCK, M. *Theory of heat*. Macmillan & Co, 1932.
- [13] HEITLER, W. *Quantum Theory of Radiation*. 2. vyd. Oxford: University Press, 1944.
- [14] ANGELOVA, R. A. *Textiles and Human Thermophysiological Comfort in the Indoor Environment*. Boca Raton: CRC Press, 2016. ISBN 9781138893627
- [15] CHOUDHURY, A. K. R., P. K. MAJUMDAR a C. DATTA. Factors affecting comfort: human physiology and the role of clothing. In: SONG, G. *Improving Ccomfort in Clothing*. Oxford: Woodhead Publishing, 2011, 3-55. ISBN 978-0-08-101432-5.
- [16] ANGELOVA, R. A. Thermal Comfort and Textile Materials. In: *Annual International Course "Ventilation and Indoor Climate"*. Bulgaria: Avanguard, 2004, 182-192.
- [17] *Report to Congress on indoor air quality*. Volume 2: Assessment and Control of Indoor Air Polution [online]. United States Environmental Protection Agency Washington, DC. 1989, [cit. 2016-05-20].  
Dostupné z: <http://nepis.epa.gov/exe/ZyPURL.cgi?Dockey=9100LMBU.txt>
- [18] BELDING, H. S. a T. F. HATCH. Index for evaluating Heat Stress in Terms of resulting Physiological Strains. *Heating, Piping and Air Conditioning*. 1955, **27**(8), 129-136.
- [19] NISHI, Y. a A.P. GAGGE. Moisture Permeation of Clothing: A Factor Governing Thermal Equilibrium and Comfort. In: *Memoirs of the Faculty of Engineering*. Hokkaido University. 1973, **13**(2), 5-13. ISSN 0368-9379.
- [20] ADLER, M. M. a W. K. WALSH. Mechanism of transient moisture transport between fabrics. *Textile Research Journal*. 1984, **54**(05), 334-343. ISSN 0040-5175.
- [21] HONG, K., N. R. S. HOLLIES a S. M. SPIVAK. Dynamic Moisture Vapor Transfer through Textiles Part I: Clothing Hygrometry and the Influence of Fiber Type. *Textile Research Journal*. 1988, **58**(12), 697-706. ISSN 0040-5175.

- [22] NAYAK, R. a R. PADHYE. *Manikins for Textile Evaluation*. Oxford: Woodhead Publishing, 2017. ISBN 9780081009093.
- [23] FOURT, L. a N. R. S. HOLLIES. *Clothing: Comfort and Function of Clothing*. New York: Marcel Dekker Inc., 1970. ISBN-10 0824712145.
- [24] SLATER, K. *Human Comfort*. Springfield: Charles C Thomas Pub Ltd., 1985. ISBN 13 9780398051280.
- [25] LI, Y. a J. M. LAYTON. The Science of Clothing Comfort. *Textile progress*. Manchester: Textile Institute International, 2001. ISBN 1-870372-24-7.
- [26] SLATER, K. Subjective Textile Testing. *The Journal of The Textile Institute*. 1997, **88**(2), 79-91. ISSN 0040-5000.
- [27] PONTRELLI, G. J. Partial analysis of Comfort's Gestalt. In: *Clothing Comfort*. USA: Michigan. 1977, 71–80.
- [28] TANG, M. K., K. CHAU, C. KAN a J. FAN. Instrumental Evaluation of Stickiness of Textiles Under Wet Skin Surface. *IEEE Access* [online]. 2018, **6**, 24777-24792 [cit. 2019-01-20]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8344794&isnumber=8274985>
- [29] ROSSI, R. Comfort and thermoregulatory requirements in cold weather clothing. In: WILLIAMS, J. T. *Textiles for Cold Weather Apparel*. Boca Raton: CRC Press, 2009, 3-18. ISBN 978-1-84569-411-1.
- [30] GREENWOOD, K. a W. H. REES. Problems of Protection and Comfort in Modern Apparel Fabrics – Reply. *The Journal of The Textile Institute*. 1971, **62**(1), 58-59. ISSN 0040-5000
- [31] UMBACH, K. H. a J. MECHEELS. Thermophysiological Properties of Clothing Systems. *Melliand Textilberichte*, 1976. ISSN 03410781.
- [32] BARTELS, V. T. a K. H. UMBACH. Assessing the physiological function of protective clothing. In: *Thermal Protection of Man Under Hot and Hazardous Conditions*. Paříž: Centre d'Etudes du Bouchet, 1999, 301-306.
- [33] KILINC-BALCI, F. S. How consumers perceive comfort in apparel. In: SONG, G. *Improving comfort in clothing*. Oxford: Woodhead Publishing, 2011, 97-113. ISBN 978-0-08-101432-5.
- [34] GOLDMAN, R. F. Biomedical Effects of Clothing on Thermal Control and Strain. In: *Handbook on Clothing*. Biomedical Research Aspects of Military Protective Clothing, 1988.
- [35] ČSN EN 60721-2-1, 2014. *Klasifikace podmínek prostředí – Část 2-1: Podmínky vyskytující se v přírodě – Teplota a vlhkost vzduchu*. Praha: Český normalizační institut, 2014.
- [36] J. BOUGOURD, J. a J. MCCANN. Factors affecting the design of cold weather performance clothing. In: WILLIAMS, J. T. *Textiles for Cold Weather Apparel*. Boca Raton: CRC Press, 2009, 152-195. ISBN 978-1-84569-411-1.
- [37] McCULLOUGH, E. A. Evaluation of cold weather clothing using manikins. In: WILLIAMS, J. T. *Textiles for Cold Weather Apparel*. Boca Raton: CRC Press, 2009, 244-255. ISBN 978-1-84569-411-1.
- [38] SCOTT, R. A. Cold weather clothing for military applications. In: WILLIAMS, J. T. *Textiles for Cold Weather Apparel*. Boca Raton: CRC Press, 2009, 305-328. ISBN 978-1-84569-411-1.
- [39] HOLMÉR, I. Textiles for protection against the cold. In: *Textiles for Protection*. Cambridge: Woodhead publishing, 2015, 378-397. ISBN 978-1-85573-921-5

- [40] WHITE, M. K. a R. RONK. Chemical Protective Clothing and Heat Stress. In: *Professional Safety*. American Society of Safety Engineers, 1984, **29**(12), 34-38. ISSN 0099-0027
- [41] LI, Y., J. H. KEIGHLEY a I. F. G. HAMPTON. Physiological responses and psychological sensations in wearer trials with knitted sportswear. *Ergonomics*. 1988, **31**(11), 1709-1721. ISSN 0014-0139
- [42] HOLLIES, N. R. S., CUSTER, A. G., MOWN, C. J., a M. E. HOWARD. A Human Perception Analysis Approach to Clothing Comfort. *Textile Research Journal*, 1979, **49**(10), 557 – 564. ISSN 0040-5175.
- [43] LAING, R. M., S. T. SIMS, C. A. WILSON, B.E. NIVEN a N. M. CRUTHERS. Differences in wearer response to garments for outdoor activity. *Ergonomics*. 2008, **51**(4), 492-510. ISSN: 0014-0139.
- [44] HOLMÉR, I. Heat exchange and thermal insulation compared in woollen and nylon garments during wear trials. *Textile research journal*, 1985, **55**(9), 511-518. ISSN: 0040-5175.
- [45] Li, Y. Perceptions of temperature, moisture and comfort in clothing during environmental transients. *Ergonomics*. 2005, **48**(3), 234-248. ISSN 0014-0139
- [46] Li, Y., B. V. HOLCOMBE, a F. APCAR. Moisture buffering behavior of hygroscopic fabric during wear. *Textile research journal*. 1992, **62**(11), 619-627. ISSN 0040-5175
- [47] BAKKEVIG, M. K. a R. NIELSEN. Impact of wet underwear on thermoregulatory responses and thermal comfort in the cold. *Journal of Ergonomics*. 1994, **37**(8), 1375-1389. ISSN 0014-0139.
- [48] BAKKEVIG, M. K. a R. NIELSEN. The impact of activity level on sweat accumulation and thermal comfort using different underwear. *Journal of Ergonomics*. 1995, **38**(5), 926-939. ISSN 0014-0139.
- [49] PARK, S. J., H. TOKURA a M. SOBAJIMA. Effects of moisture absorption of clothing on pitching speed of amateur baseball players in hot environmental conditions. *Textile research journal*. 2006, **76**(5), 383-387. ISSN: 0040-5175
- [50] MILITKÝ, J. *Textilní vlákna: klasická a speciální*. 2. vyd. V Liberci: Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-7372-844-1.
- [51] DELLJOVÁ, R. A., R. F. AFANAS'JEVA, Z. S. ČUBAROVÁ a přel. M. ŽEMLIČKA. *Hygiena odívání*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984.
- [52] GB 9994 - 2008. *Conventional moisture regains of textiles*. Čína: Standardization Administration of China.
- [53] KISSA, E. Wetting and Wicking. *Textile Research Journal* [online]. 1996, **66**(10), 660 – 668 [cit. 2019-05-21]. ISSN: 0040-5175.  
Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/004051759606601008>.
- [54] PATNAIK, A., R. S. RENGASAMY, V. K. a A. GHOSH. Wetting and Wicking in Fibrous Materials. *Textile Progress*. 2006, **38**(1), 1-105. ISSN 0040-5167.
- [55] MILLER, B. The Wetting of Fibers. In: *Surface Characteristics of Fibers and Textiles Part II*. New York, 1977, 417-446. ISBN-13 978-0824765316.
- [56] MUSADDAQ, A., A. BOUGHATTAS, J. WIENER a A. HAVELKA. Mechanism a liquid water transport in fabrics; a review. *Fibres and textiles*. 2017, **24**(4), 58 – 65. ISSN 1335-0617.
- [57] HORNÍČEK, P. *Odvod vlhkosti a tepla z povrchu lidského těla*. Liberec, 2002.
- [58] YOUNG, T. III. An essay on the cohesion of fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. Londýn: Royal Society, 1805, **95**, 65-67. ISSN 0261-0523.

- [59] WENZEL, R. N. Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Industrial & Engineering Chemistry*. 1936, **28**(8), 988-994. ISSN 0019-7866.
- [60] CASSIE, A. B. D a S. BAXTER. Wettability of porous surface. *Transactions of the Faraday Society*. 1944, **40**, 546-550. ISSN 0956-5000
- [61] WIENER, J. a P. DEJLOVÁ. Wicking and wetting in textiles. *AUTEX Research Journal* [online]. 2003, **3**(2), 64-71 [cit. 2016-05-27].  
Dostupné z: [http://www.autexrj.com/cms/zalaczone\\_pliki/3-03-2.pdf](http://www.autexrj.com/cms/zalaczone_pliki/3-03-2.pdf). ISSN 2300-0929.
- [62] BEAR, J. *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Kalifornská univerzita: American Elsevier Publishing Company, 1972.
- [63] MOIRA, a.s. *Vlákno TG 900 - Moira* [online]. © 2008 - 2017 [cit. 2020-01-26].  
Dostupné z: <https://moira.cz/clanky/14-vlakno-tg-900>
- [64] LIU, T., K. CHOI a Y. LI. Wicking in twisted yarns. *Journal of Colloid and Interface Science*. [online]. 2008, **318**(1), 134-139. [cit. 2019-05-20]. ISSN 0021-9797.  
Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.10.023>
- [65] YANILMAZ, M. a F. KALAOGLU. Investigation of wicking, wetting and drying properties of acrylic knitted fabrics. *Textile Research Journal* [online]. 2012, **82**(8), 820–831 [cit. 2019-01-21]. ISSN 1746-7748.  
Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0040517511435851>
- [66] MILITKÝ, J., D. KŘEMENÁKOVÁ a J. ŠTEFL. *Simple Method of Water Surface Spreading Kinetic on Hydrophobic Textiles*. *Vlákna a textil*. 2015, **22**(2), 27–31. ISSN 1335-0617
- [67] ZHU, G., J. MILITKÝ, Y. WANG, B. V. SUNDARLAL a D. KŘEMENÁKOVÁ. Study on the Wicking Property of Cotton Fabric. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*. 2015, **2**(110), 137-140. ISSN 1230-3666.
- [68] ISO 11092: 2014. *Textiles - Physiological effects - Measurement of thermal and water-vapour resistance under steady-state conditions (sweating guarded-hotplate test)*. 2. Geneva: International Organization for Standardization, 2014.
- [69] PEICHLOVÁ, T. *Hodnocení paropropustnosti smart textilií pro sport: The evaluation of water vapor permeability of smart textiles for sport*. Liberec, 2011. Diplomová práce. Fakulta textilní Technické univerzity v Liberci. Katedra oděvnictví. Vedooucí diplomové práce Luboš Hes.
- [70] SCHEIDEGGER, A. D. *The physics of flow through porous media*. 3. vyd. Toronto: University of Toronto Press, 1957.
- [71] GHALI, K., B. JONES and J. TRACY. Experimental Techniques for Measuring Parameters Describing Wetting and Wicking in Fabrics. *Textile Research Journal*. 1994, **64**(2), 106-111. ISSN 0040-5175.
- [72] HES, L., V. BAJZÍK a I. DOLEŽAL. A new index of thermal comfort of sport dresses and underwear in wet state. In: *International conference on emerging trends in traditional & technical textiles*. India, 2014, 10-14. ISBN 978-93-5156-700-4.
- [73] AATCC Test Method 195-2009. *Liquid moisture management properties of textile fabrics*. USA: AATCC Committee RA63, 2009.
- [74] AATCC Test Method 199-2011. *Drying time of textiles: Moisture analyser method*. USA: AATCC Committee RA63, 2011.
- [75] AATCC Test Method 200-2017. *Drying rate of fabrics: Heated plate method*. USA: AATCC Committee RA63, 2017.
- [76] AATCC Test Method 201-2014. *Drying rate of fabrics: Heated plate method*. USA: AATCC Committee RA63, 2014.

- [77] TNI CEN/TR 16422. *Klasifikace termoregulačních vlastností*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [78] ISO 17616: 2014. *Textiles: Determination of moisture drying rate*. Geneva: International organization for standardization, 2014.
- [79] JIS L 1096: 1999. *Testing methods for woven fabrics: Drying speed*. Tokyo: Japanese Standards Association, 1999.
- [80] AATCC Test Method 79. *Test Method for Absorbency of Textiles*. USA: AATCC Committee RA63, 2003.
- [81] HOLEČEK, O. *Sušení*. In: Pedagogika: labchi [online]. VŠCHT Praha, 2014 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: <http://uchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/labchi/S.pdf>
- [82] FOURT, L., A. M. SPOKNE, D. FRISHMAN a M. HARRIS. The Rate of Drying of fabrics. *Textile Research Journal* [online]. 1951, **21**(1), 26–33 [cit. 2019-01-01]. ISSN 1746-7748. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/004051755102100107>
- [83] SOUSA, L.H.C.D., A. M. SCARMAL, O.C. MOTTA LIMA, N.C. PEREIRA a E. S. MENDES. Generalization of the drying curves in convective a conductive/convective textile fabric drying. In: *Drying 2004 - Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)*. Brazil: São Paulo, 2004, vol. A, 710-717. ISBN 85904573119788590457312.
- [84] HAGHI, A. K. and H. GHANADZADEH. A study of thermal drying process. *Indian Journal of Chemical Technology*. 2005, **12**(6), 654-663. ISSN 0971-457X
- [85] HES L. a V. BAJŽÍK. Determination of the in - plane water vapour resistance of selected fabrics. In: *Proceeding of the ITTC Congress*. Izmir, 2018.
- [86] HES, L. a M. BOGUSLAWSKA-BACZEK. The effect of ribs on cooling ability of wetted shirt knits at low air velocity. In: *22<sup>nd</sup> International Conference STRUTEX*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní, 2018.
- [87] GÜNTHER, P. A. S., G. BRUNELLO, E. C. BIANCHINI a J. L. PAIVA. In: *Proceedings of the Congresso Brasileiro de Engenharia Química*. Campinas, 1984, 318-329.
- [88] BRUNELLO, G., J. L. PAIVA, P. A. S. GÜNTHER a E. C. BIANCHINI. Estudo da Cinética de Secagem de Pasta Celulósica em Leito Fixo: Modelo de Capilarida de. In: *Secagem no DEQ-EPUSP, RBE, Caderno de Engenharia Química*. 1992, **4**, 147-152.
- [89] SOUSA, L. H. C. D. Estudo da secagem de materiais têxteis. *Doctor Thesis*. Maringá, 2003.
- [90] MOTTA LIMA, O. C. The methodology of generalized drying curves applied to paper drying. *Acta Scientiarum*. 2000, **22**(5), 1173 - 1177.
- [91] KRASNIKOV, V. The methods of analysis and calculation of drying kinetics. *Drying*. 1980, 57-62. ISBN-10 0070439761. ISBN 13 9780070439764.
- [92] CIESIELCZYK, W. Universal drying curve. *Drying*. 1996, 103-110. ISBN-10 8386903066. ISBN-13 978-8386903061.
- [93] YIOTIS, A .G., A. K. STUBOS, A. G. BOUDOUVIS, I. N. TSIMPANOIANNIS a Y. C. YORTSOS. Pore-Network Modeling od Isothermal Drying in Porous Media. *Transport of Porous Media* [online]. 2005, **58**(1,2) 63-86. [cit. 2019-05-20]. ISSN 1573-1634. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11242-004-5470-8h>
- [94] HAMD AOUI, M. A. BAFFOUN, K. B. CHAABEN a F. HAMD AOUI. Experimental Study and Mathematical Model to Follow the Drying Phenomenon of Knitted Textile Fabric. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* [online]. 2013, **8**(3), 70-76. [cit. 2019-01-05]. ISSN 1558-9250. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/155892501300800308>

- [95] FILINGERI, D., D. FOURNET, S. HODDER a G. HAVENITH. Mild evaporative cooling applied to the torso provides thermoregulatory benefits during running in the heat. *Scandinavian Journal of Medicine and Science of Sports* [online]. 2015, 25(1), s200-210. [cit. 2020-01-20]. ISSN:1600-0838. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/sms.12322>
- [96] NIELSEN R. Sweat Accumulation in Clothing in the Cold. In: *Performance of Protective Clothing, Fourth Volume*. J. McBriarty & N. Henry (Eds.). 1992, 281-294. Dostupné z: <https://doi.org/10.1520/STP19168S>
- [97] HES, L. a J. HOLUBOVA. The effect of air gaps on cooling of a body. In: *Proceedings of the AUTEX International Textile Conference 2008*. Biella, 2008.
- [98] HES, L. a M. ARAUJO. Simulation of the effect of air gaps between the skin and a wet fabric on resulting cooling flow. *Textile Research Journal* [online]. 2010, 80(14), 1488–1497 [cit. 2019-01-08]. ISSN 1746-7748.  
Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0040517510361797>
- [99] CASA, D. J. Exercise in the heat. I. Fundamentals of thermal of physiology, performance implications, and dehydration. *Journal Athletic of Training* [online]. 1999, 34(3), 246-252. [cit. 2020-01-20]. ISSN: 1062-6050. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1322918/pdf/jathtrain00007-0030.pdf>
- [100] HAVENITH, G., H. UEDA, H. SARI a Y. INOUE. Required clothing ventilation for different body regions in relation to local sweat rates. In: *2nd European Conference on Protective Clothing (ECPC), "Challenges for Protective Clothing"* [online]. Švýcarsko: Montreux, 2003. [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: [https://www.academia.edu/1411568/Required\\_clothing\\_ventilation\\_for\\_different\\_body\\_regions\\_in\\_relation\\_to\\_local\\_sweat\\_rates?auto=download](https://www.academia.edu/1411568/Required_clothing_ventilation_for_different_body_regions_in_relation_to_local_sweat_rates?auto=download)
- [101] CROW, R. M. a R. J. OSCYEVSKI. The Interaction of Water with Fabrics. *Textile Research Journal* [online]. 1998, 68(4), 280–288. [cit. 2020-01-21]. ISSN: 1746-7748. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/004051759806800406>
- [102] FANGUEIRO, R., A. FILGUEIRAS, F. SOUTINHO a X. MEIDI. Wicking Behavior and Drying Capability of Functional Knitted Fabrics. *Textile Research Journal* [online]. 2010, 80(15), 1522–1530 [cit. 2019-01-24]. ISSN 1746-7748.  
Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0040517510361796>
- [103] SARICAM, C. a F. KALAOGLU. Investigation of the Wicking and Drying Behaviour of Polyester Woven Fabrics. *Fibres and Textiles in Eastern Europe* [online]. 2014, 105(3), 73-78 [cit. 2019-01-25]. ISSN 1230-3666. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/258196581\\_Investigation\\_of\\_wicking\\_wetting\\_and\\_drying\\_properties\\_of\\_acrylic\\_knitted\\_fabrics](https://www.researchgate.net/publication/258196581_Investigation_of_wicking_wetting_and_drying_properties_of_acrylic_knitted_fabrics)
- [104] BESKISIZ, E., N. UCAR a A. DEMIR. The Effects of Super Absorbent Fibers on the Washing, Dry Cleaning and Drying Behavior of Knitted Fabrics. *Textile Research Journal* [online]. 2009, 79(16), 1459-1466 [cit. 2019-01-01]. ISSN: 1746-7748.  
Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0040517508095606>
- [105] LAING, R. M., CH. A. WILSON. S. E. GORE, D. J. CARR a B. E. NIVEN. Determining the Drying Time of Apparel Fabrics. *Textile Research Journal* [online]. 2007, 77(8), 583-590 [cit. 2013-03-13]. ISSN: 1746-7748.  
Dostupné z: <http://doi.org/10.1177/0040517507078232>
- [106] HU, J., Y. LI, K. YEUNG, A. S. W. WONG a W. XU. Moisture Management Tester: A Method to Characterize Fabric Liquid Moisture Management Properties. *Textile Research Journal*. 2005, 75(1), 57-62. ISSN: 0040-5175



- [107] TROYNIKOV, O. a W. WARDININGSIH. Moisture management properties of wool/polyester and wool/bamboo knitted fabrics for the sportswear base layer. *Textile Research Journal* [online]. 2011, **81**(6), 621–631 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0040517510392461>
- [108] SUPUREN, G., N. OGLAKCIOGLU, N. OZDIL a A. MARMARALI. Moisture management and thermal absorptivity properties of double-face knitted fabrics. *Textile Research Journal* [online]. 2011, **81**(13), 1320–1330. [cit. 2019-01-05]. ISSN: 1746-7748. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0040517511402122>
- [109] PRAHSARN, C., R. L. BARKER a B. S. GUPTA. Moisture Vapor Transport Behavior of Polyester Knit Fabrics. *Textile Research Journal* [online]. 2005, **75**(4), 346–351 [cit. 2019-01-01]. ISSN: 1746-7748. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0040517505053811>
- [110] VARGA, K., A. KLJUN, M. F. NOISTERNIG, R. N. IBBETT, J. GRUBER, J. SCHLANGEN, U. J. GRIESSER a K. CH. SCHUSTER. Physiological investigation of resin-treated fabrics from Tencel® and other cellulosic fibres. *Lenzinger Berichte*. 2009, **87**, 135–141. ISSN: 0024-0907
- [111] CHAU, K. H., K. P. M. TANG a CH. W. KAN. Constant Temperature Drying Rate Tester: Real-Time Water Evaporation Measurement of Fabrics. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* [online]. 2018, **67**(11), 2635–2647 [cit. 2019-01-08]. ISSN: 1557-9662. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8338066>
- [112] TANG, K. P. M., Y. S. WU, K. H. CHAU, C. W. KAN a J. T. FAN. Characterizing the transplanar and in-plane water transport of textiles with gravimetric and image analysis technique: Spontaneous Uptake Water Transport Tester. *Scientific Reports* [online]. 2015, **5**, 1–6 [cit. 2019-01-08]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/srep09689.pdf>
- [113] DEMA, M., C. TURNER, H. SARI-SARRAF a E. HEQUET. Machine Vision System for Characterizing Horizontal Wicking and Drying Using an Infrared Camera. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* [online]. 2016, **12**(2), 493–502 [cit. 2019-12-08]. ISSN: 1941-0050. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7377070>
- [114] VITÁSKOVÁ, M. *Porovnání stavajících metod pro testování rychlosti schnutí u pletenin: Comparison of existing methods to test the speed of knits drying*. Liberec, 2015. Bakalářská práce. Fakulta textilní Technické univerzity v Liberci, Katedra hodnocení textilií. Vedoucí bakalářské práce Tereza Heinisch.
- [115] KOSTKUBOVÁ, B. *Hodnocení termofyziologických vlastností první oděvní vrstvy pro sportovní účely: Evaluation of termophysiological characteristics of the first layer of clothes in sportswear*. Liberec, 2013. Diplomová práce. Fakulta textilní Technické univerzity v Liberci, Katedra oděvnictví. Vedoucí diplomové práce Tereza Heinisch.
- [116] DĚDIČOVÁ, K. *Vliv konstrukce a počtu vrstev textilií na termofyziologické vlastnosti: Influence of construction and number of textile layers on thermal-physiological properties*. Liberec, 2012. Diplomová práce. Fakulta textilní Technické univerzity v Liberci, Katedra hodnocení textilií. Vedoucí diplomové práce Tereza Peichlová.
- [117] HEINISCH, T. Problematika měření schnutí u textilií. In: *Workshop pro doktorandy Fakulty textilní a Fakulty strojní Technické Univerzity v Liberci*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013, 41–45. ISBN 978-80-7372-987-5.
- [118] HEINISCH, T., V. BAJZÍK, a L. HES. The drying speed of outdoor textiles. In: *TEXSCI'13: textile science 2013: 8th international conference*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013, 56. ISBN 978-80-7372-989-9.

- [119] HEINISCH, T., P. TĚŠINOVÁ a L. POLOŠČUKOVÁ. Moisture management for different air conditions. *Vlakna a textil* [online]. 2017, 24(3), 64-67. ISSN 2585-8890. Dostupné z: [http://vat.ft.tul.cz/Archive/VaT\\_2017\\_3.pdf](http://vat.ft.tul.cz/Archive/VaT_2017_3.pdf)
- [120] HEINISCH, T., TĚŠINOVÁ, P a L. POLOŠČUKOVÁ. Drying speed testing of PES fabric with defined moisture management. *Fibres & Textiles in Eastern Europe* [online]. 2020, 1(139), 43-49. ISSN: 1230-3666. Dostupné z: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.5857>
- [121] ČSN ISO 139:2005. *Textilie - Normální ovzduší pro klimatizování a zkoušení*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [122] K. LABOUTKA a T. SUCHÁNEK. Výpočtové tabulky pro vytápění: vztahy a pomůcky. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2001. 208 s. ISBN 80-02-01466-9.
- [123] ČSN EN 12751:2000. *Textilie - Odběr vzorků vláken, nití a plošných textilií ke zkouškám*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [124] ČSN 12127:1998. *Textilie - Plošné textilie – Zjišťování plošné hmotnosti pomocí malých vzorků*. Praha: Český normalizační institut, 1998.
- [125] ČSN EN ISO 5084:1998. *Textilie - Plošné textilie – Zjišťování tloušťky textilií a textilních výrobků*. Praha: Český normalizační institut, 1998.
- [126] NECKÁŘ, B. *Theory of structure and mechanics of fibrous assemblies*. 2012.
- [127] KŘEMENÁKOVÁ, D. a G. KRUPINCOVÁ. Dílčí projekt: *Systém projektování textilních struktur*. Liberec: Technická univerzita v Libereci, 2004.
- [128] MILITKÝ, J. a M. HAVRDOVÁ. Porosity and air permeability of composite clean room textiles. *International Journal of Clothing Science and Technology* [online]. 2001, 13(3-4), 280-289 [cit. 2020-05-08]. ISSN: 0955-6222. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/09556220110396533/full/html>.
- [129] MELOUN, M. a J. MILITKÝ. *Statistická analýza experimentálních dat*. Praha: Academia, 2004. ISBN 80-200-1254-0
- [130] HEINISCH, T., V. BAJZÍK a L. HES. New instrument for determination of isothermal drying rate of fabrics at constant air velocity. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* [online]. 2019, 14(5) [cit. 2020-08-08]. ISSN: 1558-9250. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/1558925019873482>
- [131] KOČÍ, Vladimír. *Vazby pletenin*. Praha: SNTL, 1980.
- [132] MUGGEO, V. Segmented: An R Package to Fit Regression Models with Broken-Line Relationship. *R news* [online]. 2008, 8(1), 20-25. [cit. 2020-05-08]. ISSN 1609-3631.
- [133] ŘEHÁK, J. a B. ŘEHÁKOVÁ. *Analýza kategorizovaných dat v sociologii*. Praha: Academia, 1986.
- [134] HES, L. An indirect method for fast evaluation of surface moisture absorptivity of shirt and underwear fabrics. *Fabric and Textiles*. 2014, 7(2), 91-96. ISSN: 1335-0617.

## Seznam publikovaných prací

### Publikace v odborných časopisech

- [I] HEINISCH, T., P. TĚŠINOVÁ a L. POLOŠČUKOVÁ. Drying speed testing of PES fabric with defined moisture management. *Fibres & Textiles in Eastern Europe* [online]. 2020, 1(139), 43-49. ISSN: 1230-3666.  
Dostupné z: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.5857>
- [II] HEINISCH, T., P. TĚŠINOVÁ a L. POLOŠČUKOVÁ. Moisture management for different air conditions. *Vlakna a textil* [online]. 2017, 24(3), 64-67. ISSN 2585-8890. Dostupné z: [http://vat.ft.tul.cz/Archive/VaT\\_2017\\_3.pdf](http://vat.ft.tul.cz/Archive/VaT_2017_3.pdf)
- [III] HEINISCH, T., V. BAJZÍK a L. HES. New instrument for determination of isothermal drying rate of fabrics at constant air velocity. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* [online]. 2019, 14(5). ISSN 1558-9250.  
Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/1558925019873482>
- [IV] HEINISCH, T., V. BAJZÍK, R. KNÍŽEK a Z. GREGUŠOVÁ. Effect of the process of lamination microporous nanofiber membrane on the evaporative resistance of the two-layer laminate. *Advanced Materials Research* [online]. 2013, **677**, 103-108. ISSN 1022-6680.  
Dostupné z: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.677.103>

### Příspěvky ve sbornících

- [V] HEINISCH, T., V. BAJZÍK a L. HES. The influence air speed for moisture management. In: *International Ph.D. Students Day – 9th Central European Conference*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2017, 40-43. ISBN 978-80-7494-355-3.
- [VI] HEINISCH, T., P. TĚŠINOVÁ a L. POLOŠČUKOVÁ. Moisture management for different air conditions. In: *STRUTEX: structure and structural mechanics of textile fabrics: 21st international conference*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016, 303-308. ISBN 978-80-7494-269-3.
- [VII] HEINISCH, T., V. BAJZÍK a L. HES. Inovation of methodology for moisture management. In: *Workshop for Ph.D. Students of Faculty of Textile Engineering and Faculty of Mechanical Engineering TUL: 20th-23rd September 2016*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016, 44-49. ISBN 978-80-7494-293-8.
- [VIII] HEINISCH, T., V. BAJZÍK, a L. HES. The drying speed of outdoor textiles. In: *TEXSCI'13: textile science 2013: 8th international conference*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013, 56. ISBN 978-80-7372-989-9.

- [IX] HEINISCH, T. Problematika měření schnutí u textilií. In: *Workshop pro doktorandy Fakulty textilní a Fakulty strojní Technické Univerzity v Liberci*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013, 41-45. ISBN: 978-80-7372-987-5
- [X] HEINISCH, T., V. BAJZÍK a L. HES. The creation of textile sandwich fabrics and optimization of their properties. In: *19. STRUTEX: structure and structural mechanics of textile fabrics: 19th international conference*. Liberec: Technická univerzita v Liberec, 2012, 167-168. ISBN 978-80-7372-913-4.
- [XI] PEICHLOVÁ, T. a V. BAJZÍK. Creation of textile sandwiches fabrics and optimization of their properties due to thermophysiological properties of separate layers of materials. In: *12. World Textile Conference AUTEX*. Zagreb: university of Zagreb, 2012, 1601-1606. ISBN 978-953710549-5.
- [XII] PEICHLOVÁ, T. Creation of textile sandwiches fabrics and optimization of their properties due to thermophysiological properties of separate layers of materials. In: *Workshop pro doktorandy Fakulty textilní a Fakulty strojní Technické Univerzity v Liberci*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012, 85-89. ISBN 978-80-7372-891-5.

#### **Citace k publikaci autora [II] uvedené v databázi Scopus**

- [XIII] LEGERSKÁ, J., D. ONDRUŠOVÁ a J. KRMELA. Evaluation of thermal insulation properties and dynamic moisture transfer of knitted fabrics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, **776**(1), ISSN 1757-899X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/776/1/012100>
- [XIV] ARABULI, S., V. VLASENKO a V. MARTINKOVÁ. Liquid moisture transport performance of textiles. Evaluation of surface water absorbency of terry fabrics. *Vlákna a textil* [online]. 2018, **25**(2), 3-7. ISSN 2585-8890. Dostupné z: [http://vat.ft.tul.cz/Archive/VaT\\_2018\\_2\\_1.html](http://vat.ft.tul.cz/Archive/VaT_2018_2_1.html)
- [XV] BENLTOUFA, S., I. OUESLATI, A. BOUGHATTAS a F. FAYALA. Saturation rate determination during ascendant, horizontal and descendant capillary rise using electrical resistivity. *Vlákna a textil* [online]. 2018, **25**(2), 14-18. ISSN 2585-8890. Dostupné z: [http://vat.ft.tul.cz/Archive/VaT\\_2018\\_2\\_3.html](http://vat.ft.tul.cz/Archive/VaT_2018_2_3.html)
- [XVI] LEGERSKÁ, J. Evaluation of surface water absorbency of terry fabrics. *Vlákna a textil* [online]. 2018, **25**(2), 59-63. ISSN 2585-8890. Dostupné z: [http://vat.ft.tul.cz/Archive/VaT\\_2018\\_2\\_10.html](http://vat.ft.tul.cz/Archive/VaT_2018_2_10.html)

## **Seznam příloh**

Příloha 1: Kolísání teplot těsně pod povrchem měřicí destičky při alternativních zkušebních podmínkách

Příloha 2: Hodnoty zbývající přidané vlhkosti ve vzorkách pro ověření opakovatelnosti měření

Příloha 3: Hodnoty zbývající přidané vlhkosti ve vzorkách pro metodu A a B

Příloha 4: Rychlostní profil pro rychlost proudění  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Příloha 5: Hodnoty zbývající přidané vlhkosti ve vzorkách pro rychlosti proudění nad měřeným vzorkem  $1$  a  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

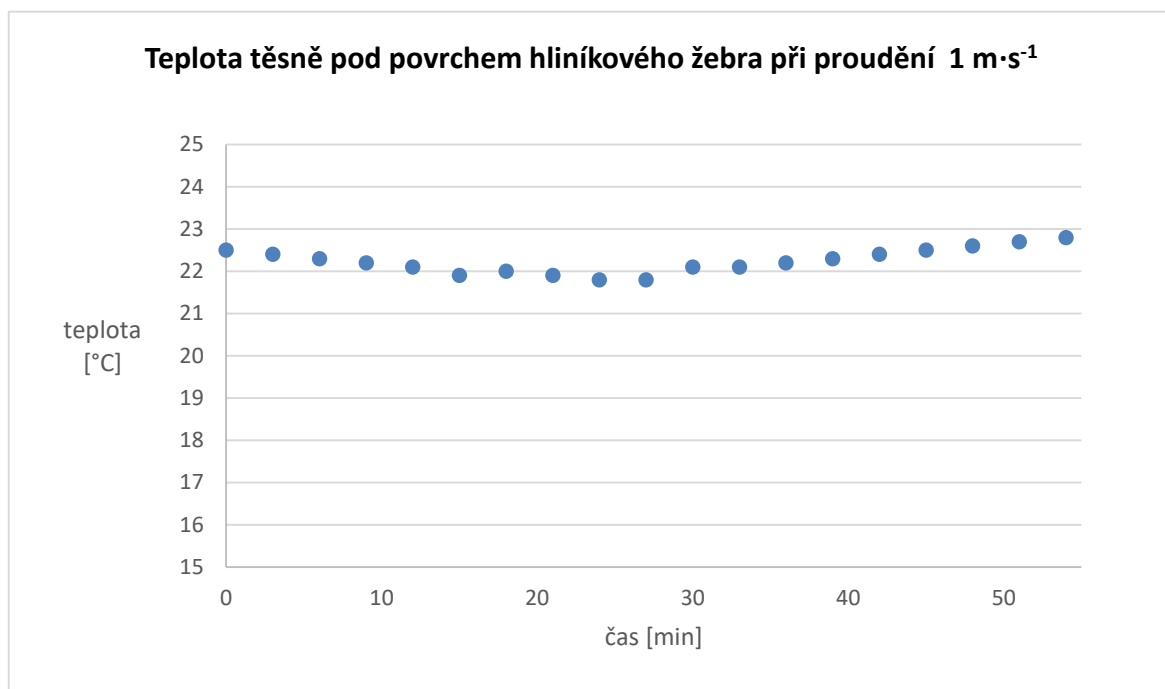
Příloha 6: Hodnoty zbývající přidané vlhkosti ve vzorkách pro izotermní a nezotermní podmínky měření

Příloha 7: Bod zlomu

Příloha 8: Naměřené hodnoty z přístroje MMT

Příloha 9: Vliv zbývající přidané vlhkosti na termofyziologický komfort

**Příloha 1:** Kolísání teplot těsně pod povrchem měřící destičky při alternativních zkušebních podmínkách



**Příloha 2:** Hodnoty zbývající přidané vlhkosti ve vzorkách pro ověření opakovatelnosti měření

T-BA					T-BA				
2 m·s <sup>-2</sup>					3 m·s <sup>-2</sup>				
čas	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota	čas	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota
[min]	[g]	[g]	[g]	[g]	[min]	[g]	[g]	[g]	[g]
0	2,37	2,31	2,34	2,34	0	2,33	2,34	2,3	2,32
3	2,33	2,18	2,18	2,23	3	2,24	2,24	2,22	2,23
6	2,19	2,07	2,09	2,12	6	2,12	2,12	2,13	2,12
9	2,07	1,97	2,01	2,02	9	2,04	2,01	2,04	2,03
12	1,95	1,85	1,85	1,88	12	1,91	1,9	1,9	1,90
15	1,81	1,73	1,78	1,77	15	1,8	1,79	1,81	1,80
18	1,71	1,64	1,68	1,68	18	1,68	1,69	1,69	1,69
21	1,59	1,53	1,53	1,55	21	1,6	1,59	1,58	1,59
24	1,48	1,43	1,44	1,45	24	1,52	1,49	1,47	1,49
27	1,39	1,31	1,37	1,36	27	1,43	1,38	1,36	1,39
30	1,26	1,23	1,29	1,26	30	1,31	1,29	1,26	1,29
33	1,17	1,13	1,2	1,17	33	1,2	1,18	1,15	1,18
36	1,08	1,04	1,05	1,06	36	1,1	1,09	1,05	1,08
39	1,03	0,94	0,9	0,96	39	0,99	0,99	0,94	0,97
42	0,94	0,83	0,82	0,86	42	0,86	0,88	0,86	0,87
45	0,82	0,74	0,74	0,77	45	0,75	0,77	0,75	0,76
48	0,71	0,65	0,64	0,67	48	0,64	0,69	0,65	0,66
51	0,61	0,55	0,58	0,58	51	0,54	0,58	0,54	0,55
54	0,49	0,46	0,5	0,48	54	0,44	0,47	0,45	0,45
57	0,38	0,37	0,42	0,39	57	0,34	0,38	0,34	0,35
60	0,29	0,28	0,35	0,31	60	0,23	0,28	0,24	0,25
63	0,22	0,2	0,27	0,23	63	0,15	0,17	0,16	0,16
66	0,13	0,13	0,2	0,15	66	0,09	0,08	0,08	0,08
69	0,07	0,08	0,13	0,09	69	0,04	0	0,03	0,02
72	0,05	0,05	0,09	0,06	72				
75	0,04	0,04	0,04	0,04	75				
78									
81									

<b>T-BA</b>				
<b>4 m·s<sup>-2</sup></b>				
<b>čas</b> <b>[min]</b>	<b>1. měření</b> <b>[g]</b>	<b>2. měření</b> <b>[g]</b>	<b>3. měření</b> <b>[g]</b>	<b>průměrná</b> <b>hodnota</b> <b>[g]</b>
<b>0</b>	2,33	2,33	2,31	<b>2,32</b>
<b>3</b>	2,19	2,17	2,15	<b>2,17</b>
<b>6</b>	2,03	2,02	2	<b>2,02</b>
<b>9</b>	1,87	1,86	1,84	<b>1,86</b>
<b>12</b>	1,72	1,72	1,7	<b>1,71</b>
<b>15</b>	1,55	1,57	1,55	<b>1,56</b>
<b>18</b>	1,42	1,42	1,4	<b>1,41</b>
<b>21</b>	1,27	1,29	1,27	<b>1,28</b>
<b>24</b>	1,12	1,14	1,12	<b>1,13</b>
<b>27</b>	0,99	1,02	1	<b>1,00</b>
<b>30</b>	0,83	0,88	0,86	<b>0,86</b>
<b>33</b>	0,69	0,74	0,72	<b>0,72</b>
<b>36</b>	0,55	0,62	0,6	<b>0,59</b>
<b>39</b>	0,44	0,47	0,45	<b>0,45</b>
<b>42</b>	0,34	0,34	0,32	<b>0,33</b>
<b>45</b>	0,22	0,23	0,21	<b>0,22</b>
<b>48</b>	0,11	0,14	0,12	<b>0,12</b>
<b>51</b>	0,05	0,07	0,05	<b>0,06</b>
<b>54</b>	0,02	0,03	0,01	<b>0,02</b>
<b>57</b>				
<b>60</b>				



**Příloha 3: Hodnoty zbývající přidané vlhkosti ve vzorkách pro metodu A a B**

<b>P-BA</b>								
	<b>metoda A</b>				<b>metoda B</b>			
<b>čas</b>	1. měření	2. měření	3. měření	<b>průměrná hodnota</b>	1. měření	2. měření	3. měření	<b>průměrná hodnota</b>
<b>[min]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>
<b>0</b>	2,83	2,81	2,88	<b>2,84</b>	1,03	1,00	1,00	<b>1,01</b>
<b>3</b>	2,71	2,73	2,76	<b>2,73</b>	0,92	0,91	0,90	<b>0,91</b>
<b>6</b>	2,59	2,63	2,62	<b>2,61</b>	0,86	0,81	0,84	<b>0,84</b>
<b>9</b>	2,44	2,51	2,49	<b>2,48</b>	0,83	0,76	0,77	<b>0,79</b>
<b>12</b>	2,32	2,38	2,36	<b>2,35</b>	0,76	0,68	0,71	<b>0,72</b>
<b>15</b>	2,19	2,26	2,24	<b>2,23</b>	0,71	0,63	0,62	<b>0,65</b>
<b>18</b>	2,05	2,13	2,1	<b>2,09</b>	0,64	0,58	0,56	<b>0,59</b>
<b>21</b>	1,92	2	1,99	<b>1,97</b>	0,58	0,51	0,48	<b>0,52</b>
<b>24</b>	1,8	1,9	1,82	<b>1,84</b>	0,50	0,44	0,41	<b>0,45</b>
<b>27</b>	1,66	1,79	1,69	<b>1,71</b>	0,46	0,38	0,34	<b>0,39</b>
<b>30</b>	1,53	1,67	1,55	<b>1,58</b>	0,39	0,30	0,27	<b>0,32</b>
<b>33</b>	1,42	1,53	1,44	<b>1,46</b>	0,35	0,25	0,21	<b>0,27</b>
<b>36</b>	1,28	1,39	1,32	<b>1,33</b>	0,27	0,20	0,15	<b>0,21</b>
<b>39</b>	1,16	1,26	1,19	<b>1,20</b>	0,21	0,16	0,11	<b>0,16</b>
<b>42</b>	1,03	1,12	1,09	<b>1,08</b>	0,18	0,10	0,08	<b>0,12</b>
<b>45</b>	0,9	1	0,96	<b>0,95</b>	0,13	0,07	0,05	<b>0,08</b>
<b>48</b>	0,79	0,86	0,85	<b>0,83</b>	0,09	0,05	0,05	<b>0,06</b>
<b>51</b>	0,66	0,73	0,75	<b>0,71</b>	0,05	0,02	0,05	<b>0,04</b>
<b>54</b>	0,54	0,62	0,62	<b>0,59</b>	0,03		0,05	
<b>57</b>	0,41	0,49	0,52	<b>0,47</b>			0,02	
<b>60</b>	0,3	0,36	0,42	<b>0,36</b>				
<b>63</b>	0,22	0,25	0,32	<b>0,26</b>				
<b>66</b>	0,15	0,18	0,18	<b>0,17</b>				
<b>69</b>	0,09	0,11	0,06	<b>0,09</b>				
<b>72</b>	0,02	0,06	0,04	<b>0,04</b>				
<b>75</b>		0,03						

P-PE								
	metoda A				metoda B			
čas	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota
[min]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
0	2,09	2,03	2,08	2,07	0,98	0,99	1,01	0,99
3	1,98	1,90	1,94	1,94	0,87	0,89	0,92	0,89
6	1,86	1,78	1,83	1,82	0,78	0,78	0,82	0,78
9	1,72	1,66	1,72	1,70	0,72	0,69	0,72	0,71
12	1,59	1,54	1,62	1,58	0,63	0,6	0,59	0,61
15	1,46	1,43	1,51	1,47	0,55	0,49	0,48	0,51
18	1,34	1,31	1,40	1,35	0,46	0,42	0,35	0,41
21	1,19	1,20	1,25	1,21	0,38	0,31	0,26	0,32
24	1,00	1,07	1,13	1,07	0,3	0,25	0,16	0,24
27	0,91	0,97	1,00	0,96	0,2	0,16	0,08	0,15
30	0,81	0,87	0,88	0,85	0,12	0,08	0,04	0,08
33	0,73	0,74	0,74	0,74	0,07	0,05	0,03	0,05
36	0,61	0,64	0,64	0,63	0,03	0,00		0,01
39	0,49	0,54	0,52	0,52				
42	0,35	0,43	0,42	0,40				
45	0,23	0,32	0,32	0,29				
48	0,12	0,23	0,21	0,19				
51	0,04	0,14	0,13	0,10				
54	0,01	0,08	0,05	0,05				
57	-0,01	0,03	0,00	0,01				
60								
63								

P-MO								
	metoda A				metoda B			
čas	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota
[min]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
0	1,67	1,67	1,65	<b>1,66</b>	0,98	0,99	1,02	<b>1,00</b>
3	1,54	1,53	1,57	<b>1,55</b>	0,94	0,98	0,95	<b>0,96</b>
6	1,39	1,40	1,47	<b>1,42</b>	0,91	0,85	0,84	<b>0,87</b>
9	1,24	1,26	1,32	<b>1,27</b>	0,74	0,78	0,76	<b>0,76</b>
12	1,12	1,12	1,17	<b>1,14</b>	0,67	0,71	0,68	<b>0,69</b>
15	0,96	0,98	1,03	<b>0,99</b>	0,57	0,63	0,59	<b>0,60</b>
18	0,84	0,84	0,91	<b>0,86</b>	0,47	0,54	0,52	<b>0,51</b>
21	0,70	0,69	0,75	<b>0,71</b>	0,41	0,45	0,43	<b>0,43</b>
24	0,58	0,58	0,60	<b>0,59</b>	0,35	0,37	0,36	<b>0,36</b>
27	0,47	0,45	0,48	<b>0,47</b>	0,27	0,31	0,30	<b>0,29</b>
30	0,36	0,34	0,35	<b>0,35</b>	0,19	0,24	0,24	<b>0,22</b>
33	0,27	0,23	0,25	<b>0,25</b>	0,14	0,19	0,18	<b>0,17</b>
36	0,17	0,16	0,17	<b>0,17</b>	0,08	0,13	0,12	<b>0,11</b>
39	0,10	0,10	0,10	<b>0,10</b>	0,05	0,07	0,10	<b>0,05</b>
42	0,06	0,03	0,08	<b>0,06</b>	0,02	0,06	0,06	<b>0,05</b>
45	0,03	0,03	0,05	<b>0,04</b>	0,00	0,05	0,04	<b>0,03</b>
48	0,01	0,01	0,02	<b>0,01</b>		0,04	0,03	
51								
54								

P-TE								
	metoda A				metoda B			
čas	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota
[min]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
0	1,87	1,92	1,93	1,91	1,00	1,00	0,97	0,99
3	1,75	1,81	1,77	1,78	0,94	0,92	0,88	0,91
6	1,63	1,7	1,65	1,66	0,87	0,80	0,77	0,81
9	1,51	1,6	1,54	1,55	0,73	0,69	0,68	0,70
12	1,46	1,48	1,41	1,45	0,63	0,61	0,60	0,61
15	1,35	1,38	1,3	1,34	0,56	0,55	0,51	0,54
18	1,24	1,28	1,18	1,23	0,48	0,48	0,42	0,46
21	1,13	1,18	1,07	1,13	0,40	0,40	0,34	0,38
24	1,03	1,05	0,96	1,01	0,33	0,34	0,28	0,32
27	0,93	0,94	0,81	0,89	0,26	0,29	0,21	0,25
30	0,81	0,83	0,72	0,79	0,20	0,18	0,15	0,18
33	0,69	0,72	0,61	0,67	0,17	0,16	0,11	0,15
36	0,58	0,61	0,5	0,56	0,13	0,10	0,09	0,11
39	0,46	0,5	0,39	0,45	0,10	0,08	0,08	0,09
42	0,36	0,4	0,32	0,36	0,09	0,08	0,06	0,08
45	0,26	0,3	0,24	0,27	0,08	0,08	0,06	0,07
48	0,18	0,21	0,18	0,19	0,05	0,04	0,04	0,04
51	0,12	0,14	0,12	0,13	0,04	0,04		
54	0,08	0,06	0,1	0,08				
57	0,05	0,03	0,08	0,05				
60	0,03	0,01	0,04	0,03				
63	0,03		0,04					
66								
69								

P-MMO								
	metoda A				metoda B			
čas	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota
[min]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
0	1,8	1,78	1,78	1,79	1,01	1,01	1,00	1,01
3	1,65	1,64	1,65	1,65	0,94	0,91	0,96	0,94
6	1,53	1,51	1,52	1,52	0,82	0,84	0,80	0,82
9	1,4	1,39	1,38	1,39	0,76	0,74	0,71	0,74
12	1,27	1,29	1,26	1,27	0,66	0,65	0,61	0,64
15	1,15	1,19	1,14	1,16	0,59	0,55	0,52	0,55
18	1,02	1,05	1,04	1,04	0,49	0,46	0,42	0,46
21	0,89	0,91	0,94	0,91	0,41	0,38	0,33	0,37
24	0,77	0,77	0,83	0,79	0,32	0,30	0,26	0,29
27	0,64	0,63	0,71	0,66	0,26	0,23	0,19	0,23
30	0,54	0,5	0,59	0,54	0,20	0,16	0,12	0,16
33	0,42	0,38	0,49	0,43	0,15	0,09	0,06	0,10
36	0,35	0,28	0,39	0,34	0,10	0,07	0,03	0,07
39	0,26	0,19	0,31	0,25	0,08	0,04	0,01	0,04
42	0,19	0,11	0,22	0,17	0,04	0,03		
45	0,15	0,07	0,16	0,13	0,00			
48	0,11	0,05	0,11	0,09				
51	0,07	0,05	0,07	0,06				
54	0,04	0,04	0,06	0,05				
57	0,03	0,02	0,02	0,02				
60	0,03	0,01						
63								
66								

P-VI								
	metoda A				metoda B			
čas	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota
[min]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
0	2,22	1,99	2,11	2,11	0,98	1,03	1,01	1,01
3	2,07	1,84	1,95	1,95	0,87	0,98	0,89	0,91
6	1,91	1,65	1,80	1,79	0,86	0,81	0,81	0,83
9	1,75	1,48	1,64	1,62	0,78	0,76	0,72	0,75
12	1,60	1,33	1,48	1,47	0,71	0,69	0,65	0,68
15	1,45	1,18	1,34	1,32	0,61	0,60	0,56	0,59
18	1,29	1,03	1,20	1,17	0,49	0,52	0,49	0,50
21	1,12	0,89	1,06	1,02	0,43	0,46	0,41	0,43
24	0,98	0,75	0,91	0,88	0,35	0,36	0,35	0,35
27	0,83	0,62	0,79	0,75	0,29	0,30	0,26	0,28
30	0,69	0,50	0,64	0,61	0,21	0,23	0,21	0,22
33	0,56	0,40	0,52	0,49	0,15	0,17	0,16	0,16
36	0,44	0,32	0,39	0,38	0,11	0,13	0,11	0,12
39	0,32	0,26	0,26	0,28	0,05	0,09	0,08	0,07
42	0,22	0,18	0,18	0,19	0,05	0,06	0,06	0,06
45	0,18	0,14	0,13	0,15	0,01	0,04	0,04	0,03
48	0,12	0,12	0,10	0,11		0,01	0,02	
51	0,08	0,10	0,08	0,09				
54	0,05	0,07	0,06	0,06				
57	0,03	0,04	0,04	0,04				
60		0,00						
63								
66								

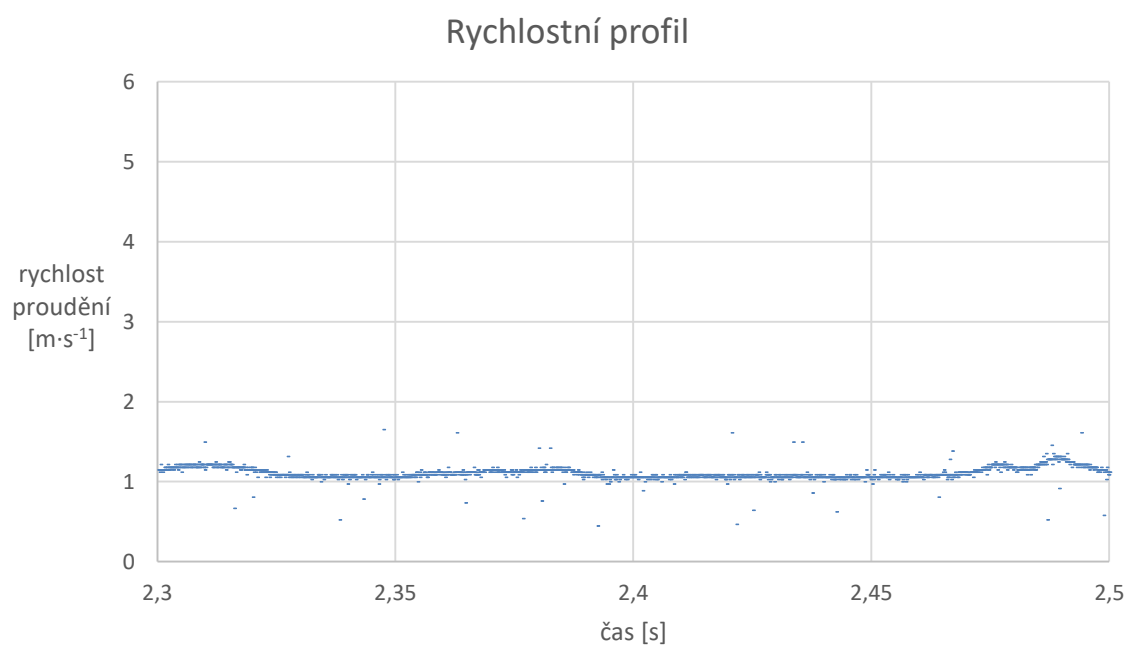
P-COOL								
	metoda A				metoda B			
čas	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota
[min]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
0	0,72	0,71	0,73	<b>0,72</b>	1,02	1,03	1,03	<b>1,03</b>
3	0,58	0,54	0,57	<b>0,56</b>	0,91	0,92	0,88	<b>0,90</b>
6	0,43	0,41	0,41	<b>0,42</b>	0,82	0,82	0,77	<b>0,80</b>
9	0,28	0,22	0,25	<b>0,25</b>	0,72	0,74	0,67	<b>0,71</b>
12	0,15	0,1	0,13	<b>0,13</b>	0,63	0,67	0,57	<b>0,62</b>
15	0,06	0,04	0,04	<b>0,05</b>	0,55	0,54	0,47	<b>0,52</b>
18	0,02	0,01	0,00	<b>0,01</b>	0,41	0,4	0,38	<b>0,40</b>
21		0,00			0,32	0,28	0,27	<b>0,29</b>
24					0,21	0,16	0,15	<b>0,17</b>
27					0,16	0,06	0,08	<b>0,10</b>
30					0,09	0,03	0,03	<b>0,05</b>
33					0,03	0,01	0,01	<b>0,02</b>
36					0,01		0,01	
39								

P-PVC								
	metoda A				metoda B			
čas	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota
[min]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
0	0,78	0,80	0,83	<b>0,80</b>	1,03	1,02	1,05	<b>1,03</b>
3	0,64	0,66	0,70	<b>0,67</b>	0,96	0,88	0,90	<b>0,91</b>
6	0,53	0,50	0,56	<b>0,53</b>	0,75	0,75	0,76	<b>0,99</b>
9	0,40	0,43	0,45	<b>0,43</b>	0,63	0,64	0,64	<b>0,64</b>
12	0,29	0,31	0,31	<b>0,30</b>	0,50	0,53	0,53	<b>0,52</b>
15	0,17	0,19	0,20	<b>0,19</b>	0,38	0,42	0,41	<b>0,40</b>
18	0,10	0,12	0,12	<b>0,11</b>	0,24	0,30	0,30	<b>0,28</b>
21	0,04	0,05	0,06	<b>0,05</b>	0,13	0,19	0,19	<b>0,17</b>
24	0,00	0,04	0,03	<b>0,02</b>	0,03	0,08	0,10	<b>0,07</b>
27					0,01	0,05	0,04	<b>0,03</b>
30					0,00	0,03		
33								

P-ME								
	metoda A				metoda B			
čas	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota
[min]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
0	2,79	2,82	2,85	<b>2,82</b>	0,99	0,98	0,95	<b>0,97</b>
3	2,65	2,7	2,76	<b>2,70</b>	0,93	0,94	0,92	<b>0,93</b>
6	2,54	2,58	2,64	<b>2,59</b>	0,90	0,90	0,88	<b>0,89</b>
9	2,46	2,47	2,52	<b>2,48</b>	0,88	0,88	0,87	<b>0,88</b>
12	2,34	2,35	2,43	<b>2,37</b>	0,86	0,85	0,85	<b>0,86</b>
15	2,25	2,25	2,35	<b>2,28</b>	0,82	0,84	0,85	<b>0,84</b>
18	2,14	2,14	2,23	<b>2,17</b>	0,82	0,81	0,81	<b>0,81</b>
21	2,05	2,03	2,15	<b>2,08</b>	0,78	0,79	0,78	<b>0,78</b>
24	1,96	1,96	2,05	<b>1,99</b>	0,77	0,77	0,77	<b>0,77</b>
27	1,86	1,85	1,96	<b>1,89</b>	0,74	0,75	0,75	<b>0,75</b>
30	1,76	1,76	1,86	<b>1,79</b>	0,72	0,72	0,74	<b>0,73</b>
33	1,65	1,63	1,77	<b>1,68</b>	0,72	0,72	0,74	<b>0,73</b>
36	1,56	1,53	1,67	<b>1,59</b>	0,71	0,69	0,72	<b>0,71</b>
39	1,47	1,39	1,58	<b>1,48</b>	0,67	0,68	0,69	<b>0,68</b>
42	1,33	1,28	1,49	<b>1,37</b>	0,65	0,67	0,67	<b>0,66</b>
45	1,24	1,21	1,39	<b>1,28</b>	0,62	0,64	0,60	<b>0,62</b>
48	1,12	1,09	1,29	<b>1,17</b>	0,58	0,60	0,59	<b>0,59</b>
51	1,01	0,99	1,21	<b>1,07</b>	0,56	0,57	0,57	<b>0,57</b>
54	0,9	0,88	1,09	<b>0,96</b>	0,55	0,55	0,52	<b>0,53</b>
57	0,8	0,79	1,01	<b>0,87</b>	0,50	0,52	0,50	<b>0,51</b>
60	0,7	0,69	0,95	<b>0,78</b>	0,49	0,50	0,46	<b>0,48</b>
63	0,61	0,58	0,82	<b>0,67</b>	0,49	0,47	0,43	<b>0,46</b>
66	0,52	0,51	0,73	<b>0,59</b>	0,46	0,43	0,41	<b>0,43</b>
69	0,44	0,43	0,65	<b>0,51</b>	0,45	0,43	0,43	<b>0,44</b>
72	0,35	0,36	0,56	<b>0,42</b>	0,41	0,42	0,40	<b>0,41</b>
75	0,29	0,31	0,47	<b>0,36</b>	0,37	0,37	0,35	<b>0,36</b>
78	0,22	0,25	0,41	<b>0,29</b>	0,34	0,32	0,28	<b>0,31</b>
81	0,16	0,23	0,32	<b>0,24</b>	0,34	0,32	0,28	<b>0,31</b>
84	0,13	0,16	0,26	<b>0,18</b>	0,31	0,28	0,25	<b>0,28</b>
87	0,09	0,12	0,2	<b>0,14</b>	0,28	0,28	0,24	<b>0,27</b>
90	0,06	0,09	0,14	<b>0,10</b>	0,23	0,22	0,20	<b>0,21</b>
93	0,04	0,07	0,11	<b>0,07</b>	0,18	0,20	0,19	<b>0,19</b>
96	0,03	0,05	0,07	<b>0,05</b>	0,16	0,18	0,14	<b>0,16</b>
99	0,02	0,04	0,04	<b>0,03</b>	0,16	0,13	0,12	<b>0,14</b>
102		0,03	0,01		0,12	0,11	0,1	<b>0,11</b>
105					0,09	0,09	0,08	<b>0,09</b>
108					0,07	0,06	0,05	<b>0,06</b>
111					0,05	0,05	0,04	<b>0,05</b>
114					0,07	0,04	0,04	<b>0,05</b>
117					0,04	0,02	0,03	<b>0,03</b>
120					0,02		0,02	



#### Příloha 4: Rychlostní profil pro rychlost proudění $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$



**Příloha 5:** Hodnoty zbývající přidané vlhkosti ve vzorkách pro rychlosti proudění nad měřeným vzorkem 1 a 2 m·s<sup>-1</sup>

<b>P-BA</b>								
	<b>1 m·s<sup>-1</sup></b>				<b>2 m·s<sup>-1</sup></b>			
<b>čas</b>	1. měření	2. měření	3. měření	<b>průměrná hodnota</b>	1. měření	2. měření	3. měření	<b>průměrná hodnota</b>
<b>[min]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>
<b>0</b>	1,03	1,00	1,00	<b>1,01</b>	1,00	0,98	0,98	<b>0,99</b>
<b>3</b>	0,92	0,91	0,90	<b>0,91</b>	0,88	0,86	0,86	<b>0,87</b>
<b>6</b>	0,86	0,81	0,84	<b>0,84</b>	0,79	0,77	0,78	<b>0,78</b>
<b>9</b>	0,83	0,76	0,77	<b>0,79</b>	0,70	0,68	0,72	<b>0,70</b>
<b>12</b>	0,76	0,68	0,71	<b>0,72</b>	0,61	0,60	0,64	<b>0,62</b>
<b>15</b>	0,71	0,63	0,62	<b>0,65</b>	0,52	0,52	0,57	<b>0,54</b>
<b>18</b>	0,64	0,58	0,56	<b>0,59</b>	0,42	0,43	0,50	<b>0,45</b>
<b>21</b>	0,58	0,51	0,48	<b>0,52</b>	0,33	0,35	0,44	<b>0,37</b>
<b>24</b>	0,50	0,44	0,41	<b>0,45</b>	0,26	0,27	0,36	<b>0,30</b>
<b>27</b>	0,46	0,38	0,34	<b>0,39</b>	0,18	0,20	0,29	<b>0,22</b>
<b>30</b>	0,39	0,30	0,27	<b>0,32</b>	0,12	0,14	0,23	<b>0,16</b>
<b>33</b>	0,35	0,25	0,21	<b>0,27</b>	0,06	0,08	0,16	<b>0,10</b>
<b>36</b>	0,27	0,20	0,15	<b>0,21</b>	0,02	0,04	0,12	<b>0,06</b>
<b>39</b>	0,21	0,16	0,11	<b>0,16</b>	0,01	0,01	0,07	<b>0,03</b>
<b>42</b>	0,18	0,10	0,08	<b>0,12</b>			0,03	
<b>45</b>	0,13	0,07	0,05	<b>0,08</b>				
<b>48</b>	0,09	0,05	0,05	<b>0,06</b>				
<b>51</b>	0,05	0,02	0,05	<b>0,04</b>				
<b>54</b>	0,03		0,05					
<b>57</b>			0,02					
<b>60</b>								

P-PE								
	$1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$				$2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$			
čas	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota
[min]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
0	0,98	0,99	1,01	<b>0,99</b>	1,00	1,03	1,01	<b>1,01</b>
3	0,87	0,89	0,92	<b>0,89</b>	0,86	0,88	0,96	<b>0,90</b>
6	0,78	0,78	0,82	<b>0,78</b>	0,73	0,77	0,81	<b>0,77</b>
9	0,72	0,69	0,72	<b>0,71</b>	0,63	0,66	0,67	<b>0,65</b>
12	0,63	0,6	0,59	<b>0,61</b>	0,53	0,55	0,58	<b>0,55</b>
15	0,55	0,49	0,48	<b>0,51</b>	0,43	0,44	0,47	<b>0,45</b>
18	0,46	0,42	0,35	<b>0,41</b>	0,31	0,33	0,36	<b>0,33</b>
21	0,38	0,31	0,26	<b>0,32</b>	0,19	0,23	0,27	<b>0,23</b>
24	0,3	0,25	0,16	<b>0,24</b>	0,11	0,14	0,17	<b>0,14</b>
27	0,2	0,16	0,08	<b>0,15</b>	0,05	0,09	0,07	<b>0,07</b>
30	0,12	0,08	0,04	<b>0,08</b>	0,01	0,05	0,02	<b>0,03</b>
33	0,07	0,05	0,03	<b>0,05</b>		0,02		
36	0,03	0,00		<b>0,01</b>				
39								
42								

P-MO								
	$1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$				$2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$			
čas	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota
[min]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
0	0,98	0,99	1,02	<b>1,00</b>	1,02	1,02	0,99	<b>1,01</b>
3	0,94	0,98	0,95	<b>0,96</b>	0,90	0,94	0,89	<b>0,91</b>
6	0,91	0,85	0,84	<b>0,87</b>	0,78	0,83	0,81	<b>0,81</b>
9	0,74	0,78	0,76	<b>0,76</b>	0,70	0,71	0,72	<b>0,71</b>
12	0,67	0,71	0,68	<b>0,69</b>	0,59	0,58	0,61	<b>0,59</b>
15	0,57	0,63	0,59	<b>0,60</b>	0,49	0,48	0,53	<b>0,50</b>
18	0,47	0,54	0,52	<b>0,51</b>	0,40	0,38	0,44	<b>0,41</b>
21	0,41	0,45	0,43	<b>0,43</b>	0,31	0,32	0,37	<b>0,33</b>
24	0,35	0,37	0,36	<b>0,36</b>	0,21	0,23	0,30	<b>0,25</b>
27	0,27	0,31	0,30	<b>0,29</b>	0,16	0,16	0,21	<b>0,18</b>
30	0,19	0,24	0,24	<b>0,22</b>	0,09	0,14	0,14	<b>0,12</b>
33	0,14	0,19	0,18	<b>0,17</b>	0,05	0,04	0,08	<b>0,06</b>
36	0,08	0,13	0,12	<b>0,11</b>	0,02	0,00	0,04	<b>0,02</b>
39	0,05	0,07	0,10	<b>0,05</b>			0,02	
42	0,02	0,06	0,06	<b>0,05</b>				
45	0,00	0,05	0,04	<b>0,03</b>				
48		0,04	0,03					
51								

P-TE								
	1 m·s <sup>-1</sup>				2 m·s <sup>-1</sup>			
čas	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota
[min]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
0	1,00	1,00	0,97	0,99	1,00	0,95	1,00	0,98
3	0,94	0,92	0,88	0,91	0,89	0,83	0,89	0,87
6	0,87	0,80	0,77	0,81	0,77	0,75	0,74	0,75
9	0,73	0,69	0,68	0,70	0,65	0,65	0,66	0,65
12	0,63	0,61	0,60	0,61	0,54	0,57	0,55	0,55
15	0,56	0,55	0,51	0,54	0,45	0,48	0,43	0,45
18	0,48	0,48	0,42	0,46	0,35	0,39	0,33	0,36
21	0,40	0,40	0,34	0,38	0,26	0,31	0,23	0,27
24	0,33	0,34	0,28	0,32	0,19	0,23	0,14	0,19
27	0,26	0,29	0,21	0,25	0,13	0,17	0,09	0,13
30	0,20	0,18	0,15	0,18	0,10	0,12	0,05	0,09
33	0,17	0,16	0,11	0,15	0,07	0,07	0,03	0,06
36	0,13	0,10	0,09	0,11	0,04	0,06	0,01	0,04
39	0,10	0,08	0,08	0,09		0,04		
42	0,09	0,08	0,06	0,08				
45	0,08	0,08	0,06	0,07				
48	0,05	0,04	0,04	0,04				
51	0,04	0,04						
54								
P-MMO								
	1 m·s <sup>-1</sup>				2 m·s <sup>-1</sup>			
čas	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota
[min]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
0	1,01	1,01	1,00	1,01	1,03	1,02	1,01	1,02
3	0,94	0,91	0,96	0,94	0,91	0,87	0,86	0,88
6	0,82	0,84	0,80	0,82	0,79	0,73	0,72	0,75
9	0,76	0,74	0,71	0,74	0,67	0,64	0,62	0,64
12	0,66	0,65	0,61	0,64	0,57	0,49	0,51	0,52
15	0,59	0,55	0,52	0,55	0,47	0,39	0,39	0,42
18	0,49	0,46	0,42	0,46	0,37	0,29	0,28	0,31
21	0,41	0,38	0,33	0,37	0,28	0,2	0,2	0,23
24	0,32	0,30	0,26	0,29	0,19	0,13	0,13	0,15
27	0,26	0,23	0,19	0,23	0,13	0,08	0,06	0,09
30	0,20	0,16	0,12	0,16	0,07	0,03	0,03	0,04
33	0,15	0,09	0,06	0,10	0,05	0,01	0,01	
36	0,10	0,07	0,03	0,07	0,02			
39	0,08	0,04	0,01	0,04				
42	0,04	0,03						
45	0,00							

P-VI								
	$1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$				$2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$			
čas	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota
[min]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
0	0,98	1,03	1,01	<b>1,01</b>	1,02	1,03	0,96	<b>1,00</b>
3	0,87	0,98	0,89	<b>0,91</b>	0,92	0,95	0,84	<b>0,90</b>
6	0,86	0,81	0,81	<b>0,83</b>	0,82	0,86	0,74	<b>0,81</b>
9	0,78	0,76	0,72	<b>0,75</b>	0,70	0,68	0,64	<b>0,67</b>
12	0,71	0,69	0,65	<b>0,68</b>	0,62	0,62	0,55	<b>0,60</b>
15	0,61	0,60	0,56	<b>0,59</b>	0,54	0,51	0,46	<b>0,50</b>
18	0,49	0,52	0,49	<b>0,50</b>	0,44	0,42	0,37	<b>0,41</b>
21	0,43	0,46	0,41	<b>0,43</b>	0,34	0,33	0,29	<b>0,32</b>
24	0,35	0,36	0,35	<b>0,35</b>	0,27	0,25	0,21	<b>0,24</b>
27	0,29	0,30	0,26	<b>0,28</b>	0,18	0,16	0,14	<b>0,16</b>
30	0,21	0,23	0,21	<b>0,22</b>	0,12	0,11	0,08	<b>0,10</b>
33	0,15	0,17	0,16	<b>0,16</b>	0,06	0,05	0,05	<b>0,05</b>
36	0,11	0,13	0,11	<b>0,12</b>	0,03	0,03	0,02	<b>0,03</b>
39	0,05	0,09	0,08	<b>0,07</b>	0,01		0,00	
42	0,05	0,06	0,06	<b>0,06</b>				
45	0,01	0,04	0,04	<b>0,03</b>				
48		0,01	0,02					
51								

P-COOL								
	$1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$				$2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$			
čas	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota
[min]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
0	1,02	1,03	1,03	<b>1,03</b>	0,99	0,96	0,97	<b>0,97</b>
3	0,91	0,92	0,88	<b>0,90</b>	0,83	0,8	0,81	<b>0,81</b>
6	0,82	0,82	0,77	<b>0,80</b>	0,63	0,62	0,61	<b>0,62</b>
9	0,72	0,74	0,67	<b>0,71</b>	0,46	0,47	0,5	<b>0,48</b>
12	0,63	0,67	0,57	<b>0,62</b>	0,32	0,3	0,34	<b>0,32</b>
15	0,55	0,54	0,47	<b>0,52</b>	0,17	0,15	0,18	<b>0,17</b>
18	0,41	0,4	0,38	<b>0,40</b>	0,06	0,04	0,05	<b>0,05</b>
21	0,32	0,28	0,27	<b>0,29</b>	0,01	0,02	0,02	<b>0,02</b>
24	0,21	0,16	0,15	<b>0,17</b>		0,01	0,01	
27	0,16	0,06	0,08	<b>0,10</b>				
30	0,09	0,03	0,03	<b>0,05</b>				
33	0,03	0,01	0,01	<b>0,02</b>				
36	0,01		0,01					
39								

P-PVC								
	<b>1 m·s<sup>-1</sup></b>				<b>2 m·s<sup>-1</sup></b>			
čas	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota
[min]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
<b>0</b>	1,03	1,02	1,05	<b>1,03</b>	1,01	1,01	0,95	<b>0,99</b>
<b>3</b>	0,96	0,88	0,90	<b>0,91</b>	0,80	0,80	0,75	<b>0,78</b>
<b>6</b>	0,75	0,75	0,76	<b>0,99</b>	0,63	0,65	0,57	<b>0,62</b>
<b>9</b>	0,63	0,64	0,64	<b>0,64</b>	0,46	0,47	0,43	<b>0,45</b>
<b>12</b>	0,50	0,53	0,53	<b>0,52</b>	0,32	0,33	0,28	<b>0,31</b>
<b>15</b>	0,38	0,42	0,41	<b>0,40</b>	0,15	0,18	0,17	<b>0,17</b>
<b>18</b>	0,24	0,30	0,30	<b>0,28</b>	0,03	0,09	0,04	<b>0,05</b>
<b>21</b>	0,13	0,19	0,19	<b>0,17</b>	-0,01	0,03	0,00	<b>0,01</b>
<b>24</b>	0,03	0,08	0,10	<b>0,07</b>				
<b>27</b>	0,01	0,05	0,04	<b>0,03</b>				
<b>30</b>	0,00	0,03						
<b>33</b>								

P-ME								
	1 m·s <sup>-1</sup>				2 m·s <sup>-1</sup>			
čas	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota
[min]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
0	0,99	0,98	0,95	<b>0,97</b>	1,01	1,01	1,02	<b>1,01</b>
3	0,93	0,94	0,92	<b>0,93</b>	0,99	0,98	0,96	<b>0,98</b>
6	0,90	0,90	0,88	<b>0,89</b>	0,92	0,93	0,92	<b>0,92</b>
9	0,88	0,88	0,87	<b>0,88</b>	0,89	0,88	0,85	<b>0,87</b>
12	0,86	0,85	0,85	<b>0,86</b>	0,86	0,85	0,81	<b>0,82</b>
15	0,82	0,84	0,85	<b>0,84</b>	0,80	0,80	0,77	<b>0,79</b>
18	0,82	0,81	0,81	<b>0,81</b>	0,79	0,80	0,78	<b>0,79</b>
21	0,78	0,79	0,78	<b>0,78</b>	0,74	0,75	0,75	<b>0,75</b>
24	0,77	0,77	0,77	<b>0,77</b>	0,72	0,74	0,72	<b>0,73</b>
27	0,74	0,75	0,75	<b>0,75</b>	0,71	0,69	0,69	<b>0,70</b>
30	0,72	0,72	0,74	<b>0,73</b>	0,67	0,68	0,67	<b>0,67</b>
33	0,72	0,72	0,74	<b>0,73</b>	0,65	0,67	0,60	<b>0,64</b>
36	0,71	0,69	0,72	<b>0,71</b>	0,62	0,64	0,58	<b>0,61</b>
39	0,67	0,68	0,69	<b>0,68</b>	0,56	0,57	0,52	<b>0,55</b>
42	0,65	0,67	0,67	<b>0,66</b>	0,53	0,55	0,49	<b>0,52</b>
45	0,62	0,64	0,60	<b>0,62</b>	0,50	0,52	0,48	<b>0,50</b>
48	0,58	0,60	0,59	<b>0,59</b>	0,47	0,49	0,43	<b>0,46</b>
51	0,56	0,57	0,57	<b>0,57</b>	0,46	0,47	0,40	<b>0,44</b>
54	0,55	0,55	0,52	<b>0,53</b>	0,45	0,42	0,35	<b>0,41</b>
57	0,50	0,52	0,50	<b>0,51</b>	0,41	0,40	0,32	<b>0,38</b>
60	0,49	0,50	0,46	<b>0,48</b>	0,39	0,32	0,30	<b>0,34</b>
63	0,49	0,47	0,43	<b>0,46</b>	0,39	0,28	0,29	<b>0,32</b>
66	0,46	0,43	0,41	<b>0,43</b>	0,34	0,22	0,27	<b>0,28</b>
69	0,45	0,43	0,43	<b>0,44</b>	0,31	0,20	0,23	<b>0,25</b>
72	0,41	0,42	0,40	<b>0,41</b>	0,28	0,18	0,19	<b>0,22</b>
75	0,37	0,37	0,35	<b>0,36</b>	0,24	0,15	0,18	<b>0,19</b>
78	0,34	0,32	0,28	<b>0,31</b>	0,20	0,13	0,17	<b>0,17</b>
81	0,34	0,32	0,28	<b>0,31</b>	0,16	0,09	0,14	<b>0,13</b>
84	0,31	0,28	0,25	<b>0,28</b>	0,14	0,09	0,12	<b>0,12</b>
87	0,28	0,28	0,24	<b>0,27</b>	0,11	0,06	0,10	<b>0,09</b>
90	0,23	0,22	0,20	<b>0,21</b>	0,09	0,05	0,05	<b>0,06</b>
93	0,18	0,20	0,19	<b>0,19</b>	0,07	0,04	0,02	<b>0,04</b>
96	0,16	0,18	0,14	<b>0,16</b>	0,05	0,02	0,02	
99	0,16	0,13	0,12	<b>0,14</b>	0,04	0,01		
102	0,12	0,11	0,1	<b>0,11</b>				
105	0,09	0,09	0,08	<b>0,09</b>				
108	0,07	0,06	0,05	<b>0,06</b>				
111	0,05	0,05	0,04	<b>0,05</b>				
114	0,07	0,04	0,04	<b>0,05</b>				
117	0,04	0,02	0,03	<b>0,03</b>				
120	0,02		0,02					

**Příloha 6:** Hodnoty zbývající přidané vlhkosti ve vzorkách pro izotermní a neizotermní podmínky měření

<b>P-BA</b>								
	<b>Izotermní podmínky</b>				<b>Neizotermní podmínky</b>			
<b>čas</b>	<b>1. měření</b>	<b>2. měření</b>	<b>3. měření</b>	<b>průměrná hodnota</b>	<b>1. měření</b>	<b>2. měření</b>	<b>3. měření</b>	<b>průměrná hodnota</b>
<b>[min]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>	<b>[g]</b>
0	2,83	2,81	2,88	<b>2,84</b>	2,82	2,82	2,85	<b>2,83</b>
3	2,71	2,73	2,76	<b>2,73</b>	2,73	2,73	2,75	<b>2,74</b>
6	2,59	2,63	2,62	<b>2,61</b>	2,63	2,62	2,66	<b>2,64</b>
9	2,44	2,51	2,49	<b>2,48</b>	2,55	2,53	2,57	<b>2,55</b>
12	2,32	2,38	2,36	<b>2,35</b>	2,47	2,45	2,49	<b>2,47</b>
15	2,19	2,26	2,24	<b>2,23</b>	2,37	2,35	2,40	<b>2,37</b>
18	2,05	2,13	2,1	<b>2,09</b>	2,26	2,24	2,31	<b>2,27</b>
21	1,92	2	1,99	<b>1,97</b>	2,17	2,15	2,20	<b>2,17</b>
24	1,8	1,9	1,82	<b>1,84</b>	2,08	2,04	2,11	<b>2,08</b>
27	1,66	1,79	1,69	<b>1,71</b>	1,98	1,95	2,04	<b>1,99</b>
30	1,53	1,67	1,55	<b>1,58</b>	1,89	1,86	1,95	<b>1,90</b>
33	1,42	1,53	1,44	<b>1,46</b>	1,80	1,76	1,85	<b>1,80</b>
36	1,28	1,39	1,32	<b>1,33</b>	1,69	1,67	1,78	<b>1,71</b>
39	1,16	1,26	1,19	<b>1,20</b>	1,61	1,59	1,67	<b>1,62</b>
42	1,03	1,12	1,09	<b>1,08</b>	1,52	1,50	1,58	<b>1,53</b>
45	0,9	1	0,96	<b>0,95</b>	1,41	1,41	1,49	<b>1,44</b>
48	0,79	0,86	0,85	<b>0,83</b>	1,33	1,32	1,40	<b>1,35</b>
51	0,66	0,73	0,75	<b>0,71</b>	1,23	1,22	1,31	<b>1,25</b>
54	0,54	0,62	0,62	<b>0,59</b>	1,15	1,13	1,22	<b>1,17</b>
57	0,41	0,49	0,52	<b>0,47</b>	1,06	1,04	1,13	<b>1,08</b>
60	0,3	0,36	0,42	<b>0,36</b>	0,96	0,95	1,04	<b>0,98</b>
63	0,22	0,25	0,32	<b>0,26</b>	0,88	0,86	0,95	<b>0,90</b>
66	0,15	0,18	0,18	<b>0,17</b>	0,79	0,76	0,86	<b>0,80</b>
69	0,09	0,11	0,06	<b>0,09</b>	0,71	0,69	0,79	<b>0,73</b>
72	0,02	0,06	0,04	<b>0,04</b>	0,63	0,60	0,68	<b>0,64</b>
75		0,03			0,55	0,51	0,60	<b>0,55</b>
78					0,48	0,44	0,52	<b>0,48</b>
81					0,40	0,38	0,43	<b>0,40</b>
84					0,35	0,31	0,36	<b>0,34</b>
87					0,29	0,25	0,30	<b>0,28</b>
90					0,24	0,20	0,25	<b>0,23</b>
93					0,20	0,17	0,19	<b>0,19</b>
96					0,14	0,12	0,14	<b>0,13</b>
99					0,12	0,09	0,09	<b>0,10</b>
102					0,10	0,08	0,08	<b>0,09</b>
105					0,08	0,06	0,06	<b>0,07</b>
108					0,06	0,05	0,04	<b>0,05</b>
111					0,06	0,05	0,02	<b>0,04</b>
114					0,05	0,04		
117					0,04	0,03		



P-COOL								
	Izotermní podmínky				Neizotermní podmínky			
čas	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota	1. měření	2. měření	3. měření	průměrná hodnota
[min]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
0	0,72	0,71	0,73	<b>0,72</b>	0,72	0,73	0,76	<b>0,74</b>
3	0,58	0,54	0,57	<b>0,56</b>	0,63	0,65	0,67	<b>0,65</b>
6	0,43	0,41	0,41	<b>0,42</b>	0,56	0,59	0,51	<b>0,55</b>
9	0,28	0,22	0,25	<b>0,25</b>	0,46	0,49	0,4	<b>0,45</b>
12	0,15	0,1	0,13	<b>0,13</b>	0,43	0,38	0,31	<b>0,37</b>
15	0,06	0,04	0,04	<b>0,05</b>	0,34	0,32	0,2	<b>0,29</b>
18	0,02	0,01	0,00	<b>0,01</b>	0,25	0,23	0,13	<b>0,20</b>
21		0,00			0,19	0,16	0,07	<b>0,14</b>
24					0,12	0,1	0,03	<b>0,08</b>
27					0,07	0,06	0,02	<b>0,05</b>
30					0,03	0,05	0	<b>0,03</b>
33					0,03	0,04		
36					0,01	0,03		
39								

## Příloha 7: Bod zlomu

### P-BA\_metoda B\_1 m·s<sup>-1</sup>

\*\*\*Regression Model with Segmented Relationship(s)\*\*\*

Call:

segmented.lm(obj = fit\_lm, seg.Z = ~x, npsi = 1)

Estimated Break-Point(s):

Est. St.Err

psi1.x **40.385** 0.685

Meaningful coefficients of the linear terms:

Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)

(Intercept) 0.9805714 0.0064613 151.76

<2e-16 \*\*\*

x -0.0216044 0.0002816 -76.72 <2e-16 \*\*\*

U1.x 0.0166044 0.0007133 23.28

NA

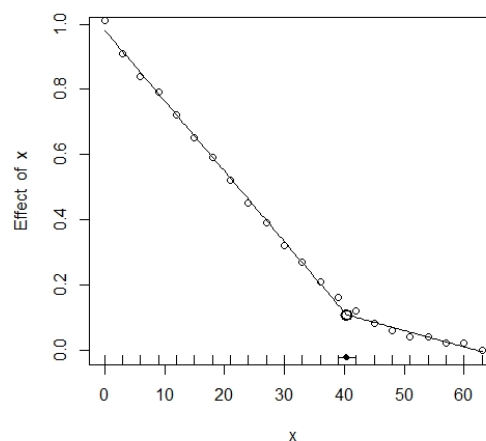
---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01274 on 18 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.9987, Adjusted R-squared: 0.9985

Convergence attained in 2 iter. (rel. change 0)



### P-BA\_metoda B\_2 m·s<sup>-1</sup>

\*\*\*Regression Model with Segmented Relationship(s)\*\*\*

Call:

segmented.lm(obj = fit\_lm, seg.Z = ~x, npsi = 1)

Estimated Break-Point(s):

Est. St.Err

psi1.x **31.077** 0.896

Meaningful coefficients of the linear terms:

Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)

(Intercept) 0.955454 0.008590 111.23 <

2e-16 \*\*\*

x -0.027333 0.000484 -56.48 6.27e-16 \*\*\*

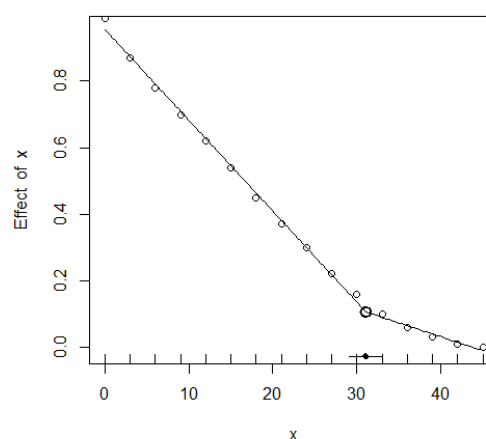
U1.x 0.019000 0.001677 11.33 NA

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01523 on 12 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.9983, Adjusted R-squared: 0.9979



## P-BA\_metoda A\_1 m·s<sup>-1</sup>

\*\*\*Regression Model with Segmented Relationship(s)\*\*\*

Call:  
segmented.lm(obj = fit\_lm, seg.Z = ~x, npsi = 1)

Residual standard error: 0.01985 on 25 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.9996, Adjusted R-squared: 0.9996

Estimated Break-Point(s):

Est. St.Err

psi1.x **65.132** 0.486

Convergence attained in 2 iter. (rel. change 0)

Meaningful coefficients of the linear terms:

Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)

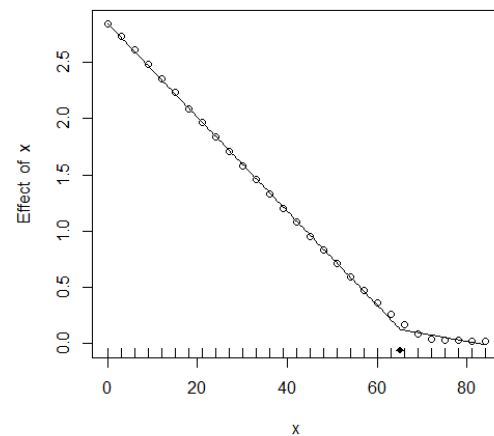
(Intercept) 2.8443478 0.0081845 347.53  
<2e-16 \*\*\*

x -0.0417109 0.0002224 -187.56 <2e-16  
\*\*\*

U1.x 0.0345680 0.0012702 27.21 NA

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.'  
0.1 ' ' 1



## P-BA \_metoda A\_1 m·s<sup>-1</sup>\_PLAST

\*\*\*Regression Model with Segmented Relationship(s)\*\*\*

segmented.lm(obj = fit\_lm, seg.Z = ~x, npsi = 1)

Residual standard error: 0.02247 on 36 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.9994, Adjusted R-squared: 0.9994

Estimated Break-Point(s):

Est. St.Err

psi1.x **84.915** 0.734

Convergence attained in 2 iter. (rel. change 0)

Meaningful coefficients of the linear terms:

Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)

(Intercept) 2.8098621 0.0081341 345.44  
<2e-16 \*\*\*

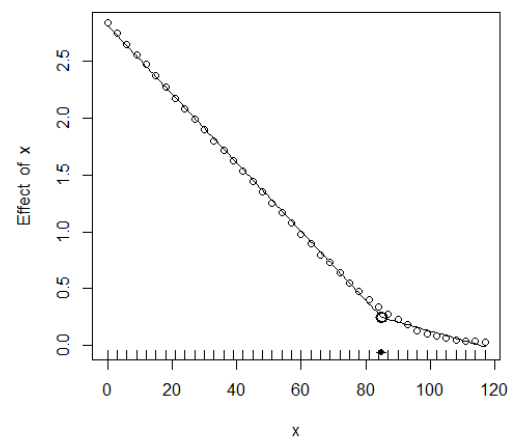
x -0.0301363 0.0001662 -181.28 <2e-16  
\*\*\*

U1.x 0.0221060 0.0007333 30.15

NA

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.'  
' ' 0.1 ' ' 1



## P-PE\_metoda B\_1 m·s<sup>-1</sup>

\*\*\*Regression Model with Segmented Relationship(s)\*\*\*

Call:  
segmented.lm(obj = fit\_lm, seg.Z = ~x, npsi = 1)

Estimated Break-Point(s):

Est. St.Err  
psi1.x **28.454** 0.568

Meaningful coefficients of the linear terms:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	0.9812727	0.0051452	190.72	< 2e-16 ***

x	-0.0311313	0.0003213	-96.90	6.73e-15 ***
---	------------	-----------	--------	--------------

U1.x	0.0211313	0.0020882	10.12	
------	-----------	-----------	-------	--

NA

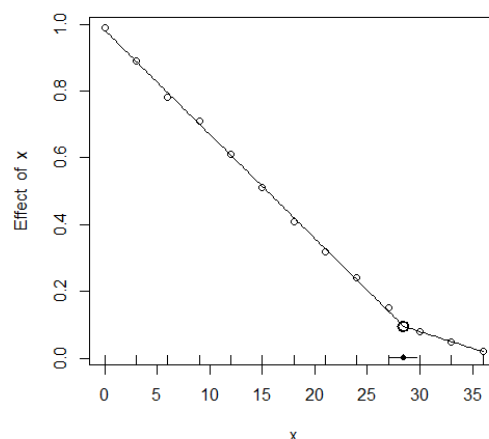
---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.008754 on 9 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.9995, Adjusted R-squared: 0.9993

Convergence attained in 2 iter. (rel. change 0)



## P-PE\_metoda B\_2 m·s<sup>-1</sup>

\*\*\*Regression Model with Segmented Relationship(s)\*\*\*

Call:  
segmented.lm(obj = fit\_lm, seg.Z = ~x, npsi = 1)

Estimated Break-Point(s):

Est. St.Err  
psi1.x **22.422** 1.03

Meaningful coefficients of the linear terms:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	0.924167	0.013227	69.869	3.23e-11 ***

x	-0.038135	0.001054	-36.182	3.20e-09 ***
---	-----------	----------	---------	--------------

U1.x	0.028135	0.004944	5.691	NA
------	----------	----------	-------	----

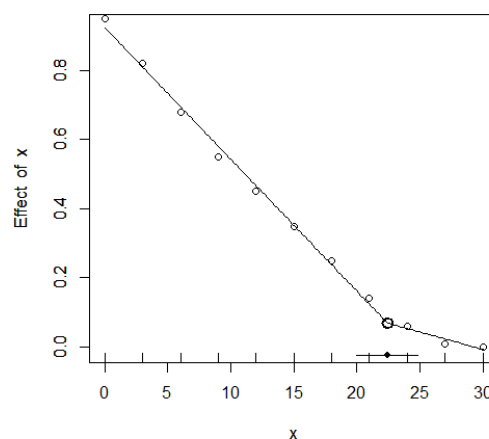
---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.02049 on 7 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.9973, Adjusted R-squared: 0.9962

Convergence attained in 2 iter. (rel. change 0)



## P-PE\_metoda A\_1 m·s<sup>-1</sup>

\*\*\*Regression Model with Segmented Relationship(s)\*\*\*

Call:  
segmented.lm(obj = fit\_lm, seg.Z = ~x, npsi = 1)

Estimated Break-Point(s):

Est. St.Err  
psi1.x **49.348** 0.683

Meaningful coefficients of the linear terms:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	2.0513725	0.0080108	256.08	<2e-16 ***
x	-0.0394199	0.0002847	-138.49	<2e-16 ***
U1.x	0.0290866	0.0025870	11.24	
NA				

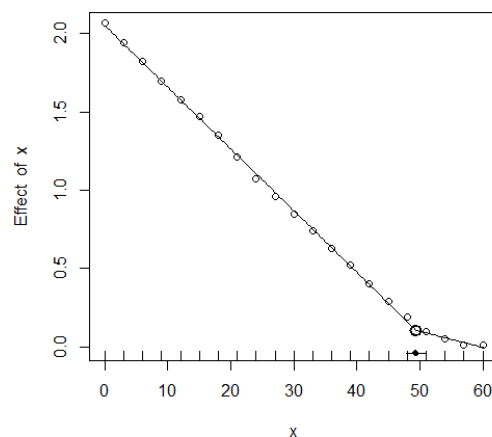
---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01725 on 17 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.9995, Adjusted R-squared: 0.9994

Convergence attained in 2 iter. (rel. change 0)



## P-MO\_metoda B\_1 m·s<sup>-1</sup>

\*\*\*Regression Model with Segmented Relationship(s)\*\*\*

Call:  
segmented.lm(obj = fit\_lm, seg.Z = ~x, npsi = 1)

Estimated Break-Point(s):

Est. St.Err

psi1.x **31.589** 1.103

Meaningful coefficients of the linear terms:

Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)

(Intercept) 1.0150000 0.0105037 96.63 < 2e-16 \*\*\*

x -0.0271212 0.0005918 -45.83 9.26e-16 \*\*\*

U1.x 0.0172165 0.0015974 10.78

NA

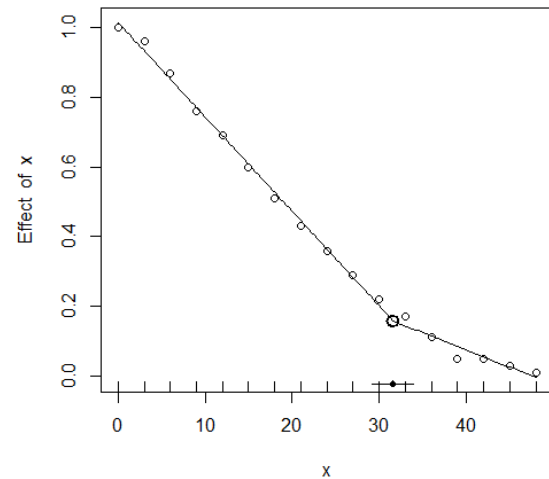
---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01862 on 13 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.9976, Adjusted R-squared: 0.997

Convergence attained in 2 iter. (rel. change 0)



## P-MO\_metoda B\_2 m·s<sup>-1</sup>

\*\*\*Regression Model with Segmented Relationship(s)\*\*\*

Call:  
segmented.lm(obj = fit\_lm, seg.Z = ~x, npsi = 1)

Estimated Break-Point(s):

Est. St.Err

psi1.x **22.789** 1.012

Meaningful coefficients of the linear terms:

Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)

(Intercept) 1.0050000 0.0096100 104.58 < 2e-16 \*\*\*

x -0.0329762 0.0007657 -43.06 1.09e-12 \*\*\*

U1.x 0.0159286 0.0014120 11.28

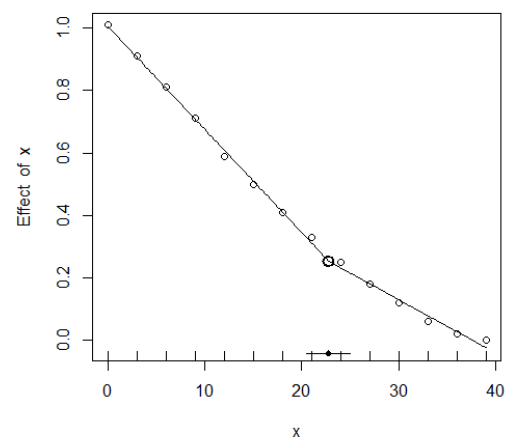
NA

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01489 on 10 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.9985, Adjusted R-squared: 0.9981

Convergence attained in 2 iter. (rel. change 0)



## P-MO\_metoda A\_1 m·s<sup>-1</sup>

\*\*\*Regression Model with Segmented Relationship(s)\*\*\*

Call:  
segmented.lm(obj = fit\_lm, seg.Z = ~x, npsi = 1)

Estimated Break-Point(s):

Est. St.Err  
psi1.x **32.123** 0.627

Meaningful coefficients of the linear terms:

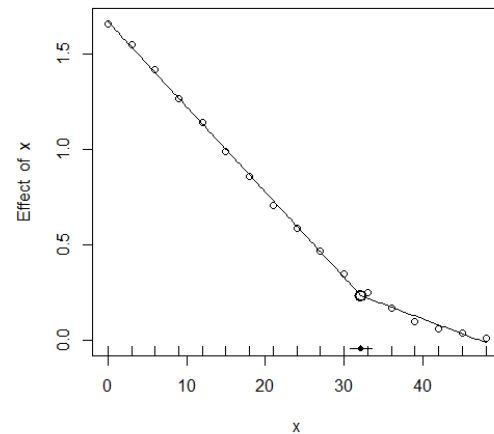
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	1.6718182	0.0103321	161.81	<2e-16 ***
x	-0.0447273	0.0005821	-76.83	<2e-16 ***
U1.x	0.0292035	0.0015713	18.59	
NA				

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01832 on 13 degrees of freedom  
Multiple R-Squared: 0.9992, Adjusted R-squared: 0.999

Convergence attained in 2 iter. (rel. change 0)



## P-TE\_metoda B\_1 m·s<sup>-1</sup>

\*\*\*Regression Model with Segmented Relationship(s)\*\*\*

Call:  
segmented.lm(obj = fit\_lm, seg.Z = ~x, npsi = 1)

Estimated Break-Point(s):

Est. St.Err  
psi1.x **30.599** 0.737

Meaningful coefficients of the linear terms:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	0.9659091	0.0107071	90.21	<2e-16 ***
x	-0.0271212	0.0006033	-44.96	<2e-16 ***
U1.x	0.0227172	0.0009215	24.65	NA

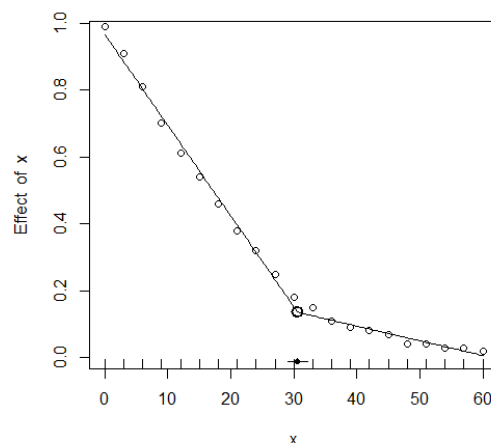
---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01898 on 17 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.997, Adjusted R-squared: 0.9964

Convergence attained in 2 iter. (rel. change 0)



## P-TE\_metoda B\_2 m·s<sup>-1</sup>

\*\*\*Regression Model with Segmented Relationship(s)\*\*\*

Call:  
segmented.lm(obj = fit\_lm, seg.Z = ~x, npsi = 1)

Estimated Break-Point(s):

Est. St.Err  
psi1.x **25.399** 0.569

Meaningful coefficients of the linear terms:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	0.959333	0.009184	104.46	<2e-16 ***
x	-0.033000	0.000643	-51.32	1.97e-15 ***
U1.x	0.026690	0.001140	23.41	NA

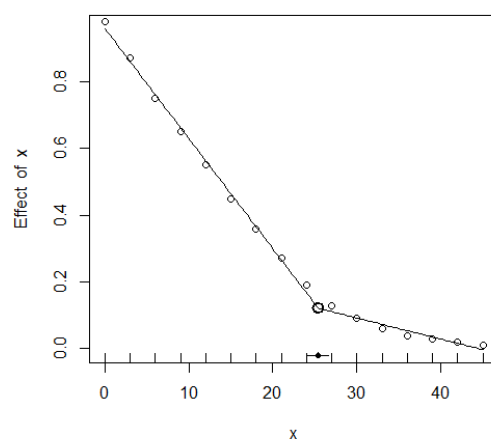
---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01494 on 12 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.9983, Adjusted R-squared: 0.9979

Convergence attained in 2 iter. (rel. change 0)





## P-TE\_ metoda A\_1 m·s<sup>-1</sup>

\*\*\*Regression Model with Segmented Relationship(s)\*\*\*

Call:  
segmented.lm(obj = fit\_lm, seg.Z = ~x, npsi = 1)

Estimated Break-Point(s):

Est. St.Err  
psi1.x **47.114** 0.545

Meaningful coefficients of the linear terms:

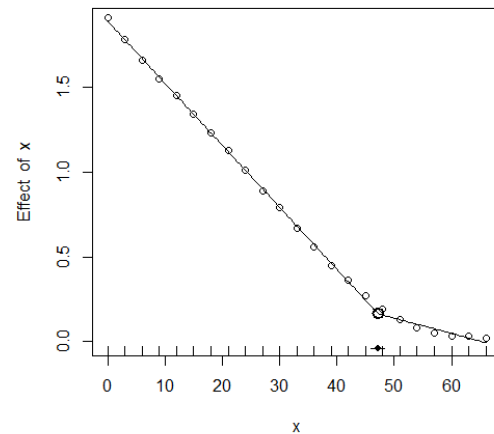
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	1.8887500	0.0080602	234.33	<2e-16 ***
x	-0.0365833	0.0003052	-119.87	<2e-16 ***
U1.x	0.0275357	0.0011064	24.89	
NA				

---  
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01688 on 19 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.9994, Adjusted R-squared: 0.9993

Convergence attained in 2 iter. (rel. change 0)



## P-MMO\_metoda B\_1 m·s<sup>-1</sup>

\*\*\*Regression Model with Segmented Relationship(s)\*\*\*

Call:  
segmented.lm(obj = fit\_lm, seg.Z = ~x, npsi = 1)

Estimated Break-Point(s):

Est. St.Err  
psi1.x **31.106** 0.786

Meaningful coefficients of the linear terms:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	1.0009091	0.0100943	99.16	< 2e-16 ***
x	-0.0290909	0.0005687	-51.15	2.24e-16 ***
U1.x	0.0236623	0.0015352	15.41	NA

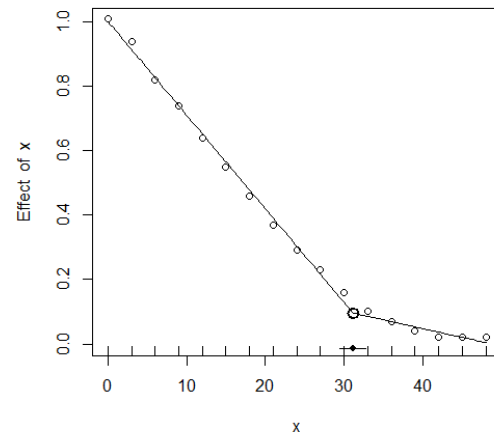
---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.0179 on 13 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.9978, Adjusted R-squared: 0.9973

Convergence attained in 2 iter. (rel. change 0)



## P-MMO\_metoda B\_2 m·s<sup>-1</sup>

\*\*\*Regression Model with Segmented Relationship(s)\*\*\*

Call:  
segmented.lm(obj = fit\_lm, seg.Z = ~x, npsi = 1)

Estimated Break-Point(s):

Est. St.Err  
psi1.x **22.302** 0.913

Meaningful coefficients of the linear terms:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	0.991667	0.013168	75.31	6.49e-14 ***
x	-0.037659	0.001049	-35.89	5.01e-11 ***
U1.x	0.025992	0.002393	10.86	NA

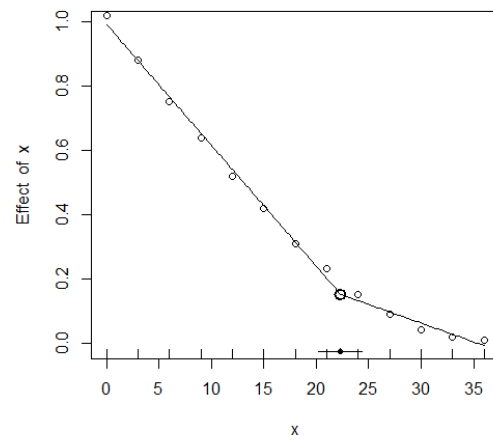
---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.0204 on 9 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.9974, Adjusted R-squared: 0.9965

Convergence attained in 2 iter. (rel. change 0)



## P-MMO\_metoda A\_1 m·s<sup>-1</sup>

\*\*\*Regression Model with Segmented Relationship(s)\*\*\*

Call:  
segmented.lm(obj = fit\_lm, seg.Z = ~x, npsi = 1)

Estimated Break-Point(s):

	Est.	St.Err
psi1.x	<b>37.944</b>	0.556

Meaningful coefficients of the linear terms:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	1.7669231	0.0089697	196.99	<2e-16 ***
x	-0.0405128	0.0004228	-95.81	<2e-16 ***
U1.x	0.0286081	0.0011580	24.70	
NA				

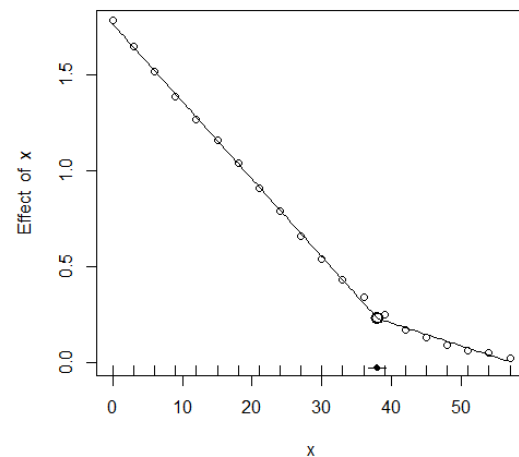
---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01711 on 16 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.9993, Adjusted R-squared: 0.9992

Convergence attained in 2 iter. (rel. change 0)



## P-VI\_metoda B\_1 m·s<sup>-1</sup>

\*\*\*Regression Model with Segmented Relationship(s)\*\*\*

Call:  
segmented.lm(obj = fit\_lm, seg.Z = ~x, npsi = 1)

Estimated Break-Point(s):

Est. St.Err  
psi1.x **31.681** 0.692

Meaningful coefficients of the linear terms:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	0.9922727	0.0072069	137.68	<2e-16 ***
x	-0.0264545	0.0004061	-65.15	<2e-16 ***
U1.x	0.0178831	0.0009015	19.84	NA

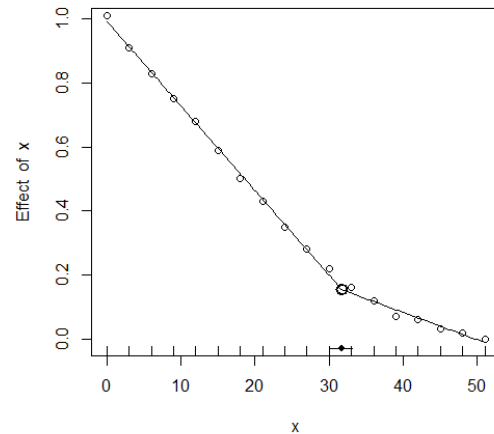
---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01278 on 14 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.9988, Adjusted R-squared: 0.9986

Convergence attained in 2 iter. (rel. change 0)



## P-VI\_metoda B\_2 m·s<sup>-1</sup>

\*\*\*Regression Model with Segmented Relationship(s)\*\*\*

Call:  
segmented.lm(obj = fit\_lm, seg.Z = ~x, npsi = 1)

Estimated Break-Point(s):

Est. St.Err  
psi1.x **28.611** 0.712

Meaningful coefficients of the linear terms:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	0.9840000	0.0101829	96.63	<2e-16 ***
x	-0.0313333	0.0006358	-49.28	3.19e-15 ***
U1.x	0.0252381	0.0015199	16.61	NA

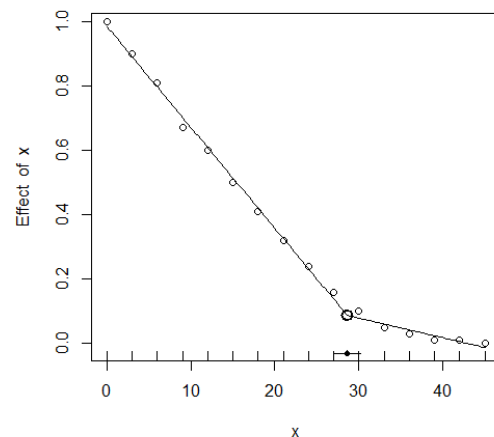
---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01733 on 12 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.998, Adjusted R-squared: 0.9975

Convergence attained in 2 iter. (rel. change 0)



## P-VI\_metoda A\_1 m·s<sup>-1</sup>

\*\*\*Regression Model with Segmented Relationship(s)\*\*\*

Call:  
segmented.lm(obj = fit\_lm, seg.Z = ~x, npsi = 1)

Estimated Break-Point(s):

Est. St.Err  
psi1.x **37.99** 0.645

Meaningful coefficients of the linear terms:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	2.070220	0.015994	129.43	<2e-16 ***

x	-0.048516	0.000754	-64.35	<2e-16 ***
---	-----------	----------	--------	------------

U1.x	0.039688	0.001350	29.40	NA
------	----------	----------	-------	----

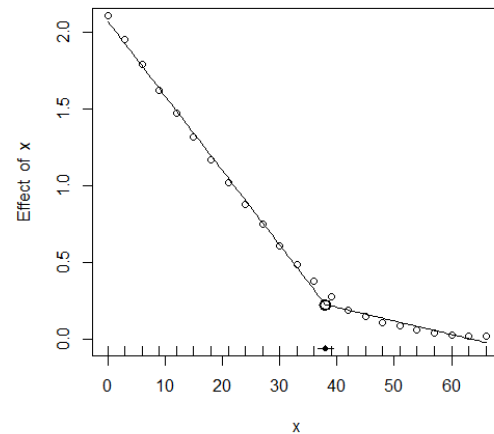
---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.03052 on 19 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.9984, Adjusted R-squared: 0.9981

Convergence attained in 2 iter. (rel. change 0)



## P-ME\_metoda B\_1 m·s<sup>-1</sup>

\*\*\*Regression Model with Segmented Relationship(s)\*\*\*

Call:  
segmented.lm(obj = fit\_lm, seg.Z = ~x, npsi = 1)

Estimated Break-Point(s):

Est. St.Err  
psi1.x **111.151** 2.729

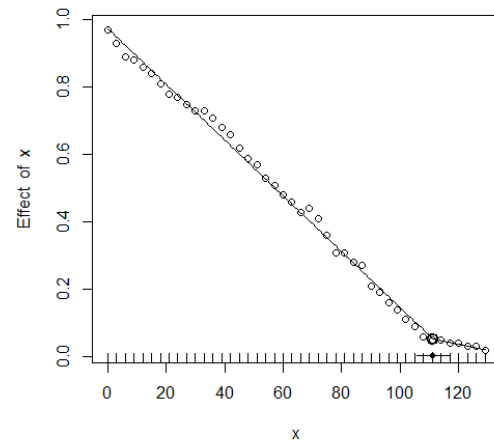
Meaningful coefficients of the linear terms:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	9.750e-01	5.777e-03	168.774	<2e-16 ***
x	-8.289e-03	8.954e-05	-92.566	<2e-16 ***
U1.x	6.479e-03	1.450e-03	4.469	NA

---  
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01816 on 40 degrees of freedom  
Multiple R-Squared: 0.9967, Adjusted R-squared: 0.9965

Convergence attained in 2 iter. (rel. change 0)



## P-ME\_metoda B\_2 m·s<sup>-1</sup>

\*\*\*Regression Model with Segmented Relationship(s)\*\*\*

Call:  
segmented.lm(obj = fit\_lm, seg.Z = ~x, npsi = 1)

Estimated Break-Point(s):

Est. St.Err  
psi1.x **73.419** 4.301

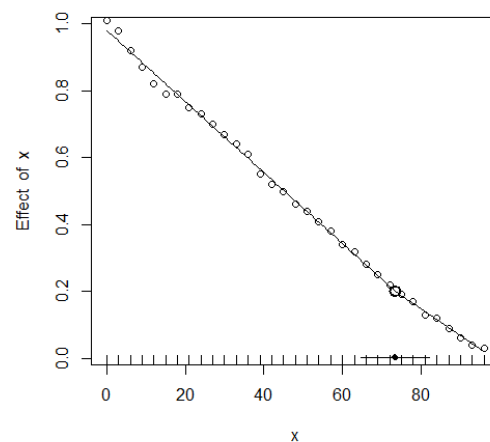
Meaningful coefficients of the linear terms:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	0.9808000	0.0054180	181.026	<2e-16 ***
x	-0.0106333	0.0001290	-82.429	<2e-16 ***
U1.x	0.0026571	0.0007292	3.644	NA

---  
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01395 on 29 degrees of freedom  
Multiple R-Squared: 0.998, Adjusted R-squared: 0.9978

Convergence attained in 2 iter. (rel. change 0)



## P-ME\_metoda A\_1 m·s<sup>-1</sup>

\*\*\*Regression Model with Segmented Relationship(s)\*\*\*

Call:  
segmented.lm(obj = fit\_lm, seg.Z = ~x, npsi = 1)

Estimated Break-Point(s):

	Est.	St.Err
psi1.x	<b>71.914</b>	0.713

Meaningful coefficients of the linear terms:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	2.7893000	0.0079486	350.92	<2e-16 ***
x	-0.0335304	0.0001974	-169.87	<2e-16 ***
U1.x	0.0198638	0.0006681	29.73	
NA				

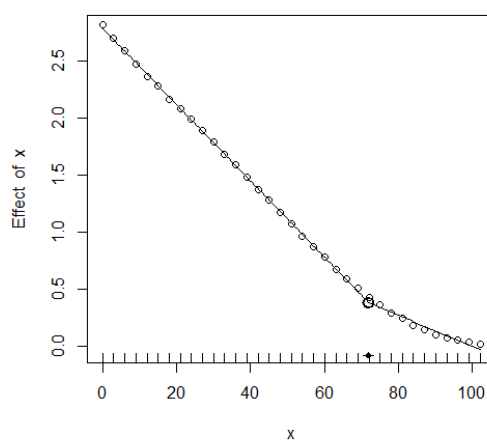
---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.02008 on 31 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.9996, Adjusted R-squared: 0.9995

Convergence attained in 2 iter. (rel. change 0)



## P-COOL\_metoda B\_1 m·s<sup>-1</sup>

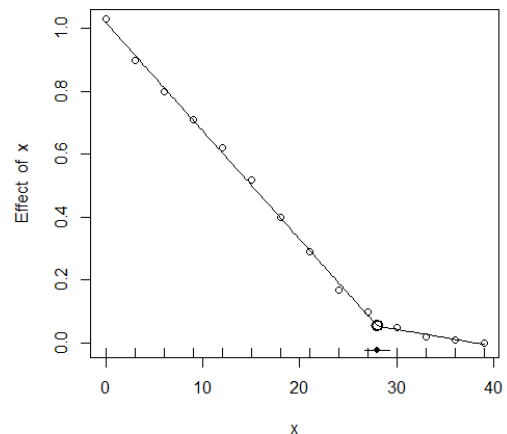
\*\*\*Regression Model with Segmented Relationship(s)\*\*\*  
 Call:  
 segmented.lm(obj = fit\_lm, seg.Z = ~x, npsi = 1)

Estimated Break-Point(s):  
 Est. St.Err  
 psi1.x **27.986** 0.58

Meaningful coefficients of the linear terms:  
 Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)  
 (Intercept) 1.0192727 0.0079068 128.91  
 < 2e-16 \*\*\*  
 x -0.0344646 0.0004937 -69.81  
 8.87e-15 \*\*\*  
 U1.x 0.0291313 0.0020653 14.11  
 NA  
 ---  
 Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*'  
 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01345 on 10 degrees of freedom  
 Multiple R-Squared: 0.9989, Adjusted R-squared: 0.9986

Convergence attained in 2 iter. (rel. change 0)



## P-COOL\_metoda B\_2 m·s<sup>-1</sup>

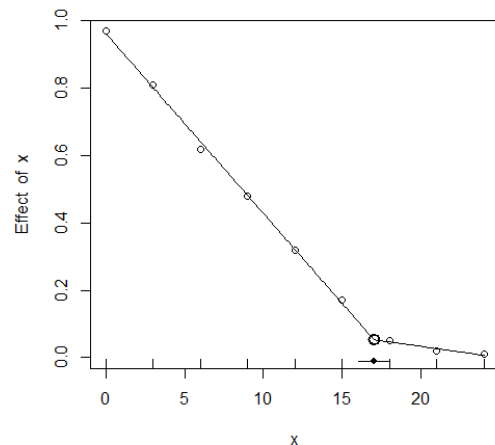
\*\*\*Regression Model with Segmented Relationship(s)\*\*\*  
 Call:  
 segmented.lm(obj = fit\_lm, seg.Z = ~x, npsi = 1)

Estimated Break-Point(s):  
 Est. St.Err  
 psi1.x **17.016** 0.366

Meaningful coefficients of the linear terms:  
 Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)  
 (Intercept) 0.962381 0.008856 108.67  
 1.25e-09 \*\*\*  
 x -0.053429 0.000975 -54.80 3.83e-08 \*\*\*  
 U1.x 0.046762 0.003044 15.36  
 NA  
 ---  
 Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*'  
 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01224 on 5 degrees of freedom  
 Multiple R-Squared: 0.9993, Adjusted R-squared: 0.9988

Convergence attained in 2 iter. (rel. change 0)





## P-COOL\_metoda A\_1 m·s<sup>-1</sup>

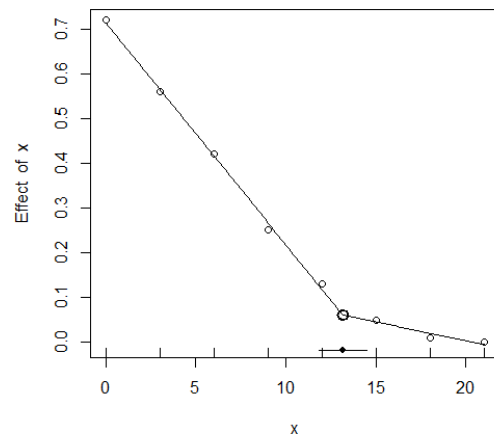
\*\*\*Regression Model with Segmented Call:  
Call:  
segmented.lm(obj = fit\_lm, seg.Z = ~x, npsi  
= 1)

Estimated Break-Point(s):  
Est. St.Err  
psi1.x **13.161** 0.482

Meaningful coefficients of the linear terms:  
Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)  
(Intercept) 0.714000 0.009950 71.76  
2.26e-07 \*\*\*  
x -0.049667 0.001354 -36.68 3.30e-  
06 \*\*\*  
U1.x 0.041333 0.003317 12.46  
NA  
---  
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*'  
0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01285 on 4  
degrees of freedom  
Multiple R-Squared: 0.9987, Adjusted R-  
squared: 0.9978

Convergence attained in 2 iter. (rel. change  
0)



## P-COOL\_metoda A\_1 m·s<sup>-1</sup> PLAST

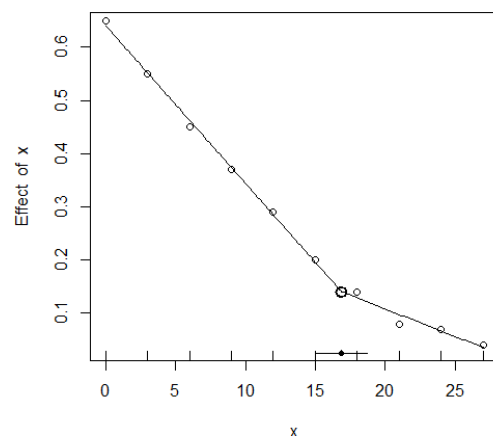
\*\*\*Regression Model with Segmented  
Relationship(s)\*\*\*  
Call:  
segmented.lm(obj = fit\_lm, seg.Z = ~x, npsi  
= 1)

Estimated Break-Point(s):  
Est. St.Err  
psi1.x **16.877** 0.766

Meaningful coefficients of the linear terms:  
Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)  
(Intercept) 0.6404762 0.0082545 77.59  
3.09e-10 \*\*\*  
x -0.0296190 0.0009088 -32.59  
5.55e-08 \*\*\*  
U1.x 0.0192857 0.0019278 10.00  
NA  
---  
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05  
'.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01141 on 6  
degrees of freedom  
Multiple R-Squared: 0.9981, Adjusted R-  
squared: 0.9972

Convergence attained in 2 iter. (rel. change  
0)



## P-PVC\_metoda B\_1 m·s<sup>-1</sup>

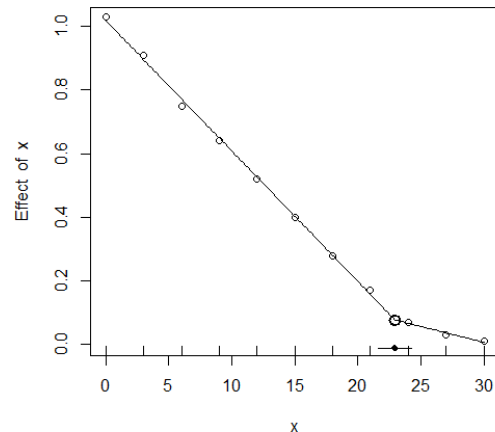
\*\*\*Regression Model with Segmented Relationship(s)\*\*\*  
 Call:  
 segmented.lm(obj = fit\_lm, seg.Z = ~x, npsi = 1)

Estimated Break-Point(s):  
 Est. St.Err  
 psi1.x **22.934** 0.567

Meaningful coefficients of the linear terms:  
 Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)  
 (Intercept) 1.0183333 0.0085017 119.780  
 7.45e-13 \*\*\*  
 x -0.0410317 0.0006774 -60.570  
 8.78e-11 \*\*\*  
 U1.x 0.0310317 0.0031774 9.766  
 NA  
 ---  
 Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*'  
 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01317 on 7 degrees of freedom  
 Multiple R-Squared: 0.9991, Adjusted R-squared: 0.9987

Convergence attained in 2 iter. (rel. change 0)



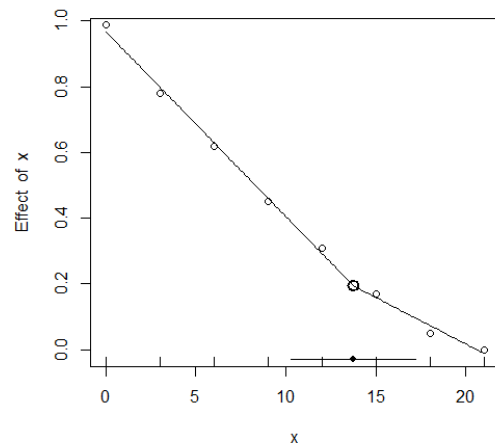
## P-PVC\_metoda B\_2 m·s<sup>-1</sup>

\*\*\*Regression Model with Segmented Relationship(s)\*\*\*  
 Call:  
 segmented.lm(obj = fit\_lm, seg.Z = ~x, npsi = 1)

Estimated Break-Point(s):  
 Est. St.Err  
 psi1.x **13.738** 1.246

Meaningful coefficients of the linear terms:  
 Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)  
 (Intercept) 0.968000 0.018193 53.206  
 7.47e-07 \*\*\*  
 x -0.056333 0.002476 -22.754 2.21e-05 \*\*\*  
 U1.x 0.028000 0.006064 4.617  
 NA  
 ---  
 Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*'  
 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.02349 on 4 degrees of freedom  
 Multiple R-Squared: 0.9975, Adjusted R-squared: 0.9956  
 Convergence attained in 2 iter. (rel. change 0)



## P-PVC\_metoda A\_1 m·s<sup>-1</sup>

\*\*\*Regression Model with Segmented Relationship(s)\*\*\*

Call:  
segmented.lm(obj = fit\_lm, seg.Z = ~x, npsi = 1)

Estimated Break-Point(s):

Est. St.Err  
psi1.x **16.266** 0.657

Meaningful coefficients of the linear terms:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	0.7909524	0.0081363	97.213	2.18e-09 ***

x	-0.0405714	0.0008958	-45.292	9.91e-08 ***
---	------------	-----------	---------	--------------

U1.x	0.0255714	0.0027971	9.142	NA
------	-----------	-----------	-------	----

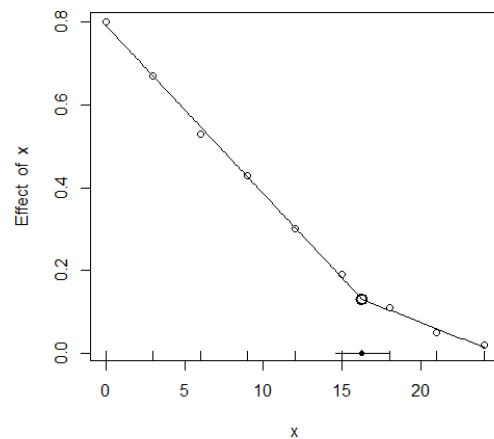
---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01124 on 5 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.999, Adjusted R-squared: 0.9984

Convergence attained in 2 iter. (rel. change 0)



## Příloha 8: Naměřené hodnoty z přístroje MMT

Vzorky		Doba navlhčení horní strana [s]	Doba navlhčení spodní strana [s]	Rychlost absorpce [%·s <sup>-1</sup> ] horní strana	Rychlost absorpce [%·s <sup>-1</sup> ] spodní strana	Horní strana maximální radius navlhčení [mm]	Spodní strana maximální radius navlhčení [mm]	Horní strana rychlost šíření vlhkosti [mm·s <sup>-1</sup> ]	Spodní strana rychlost šíření vlhkosti [mm·s <sup>-1</sup> ]	Index kumulativního jednosměrného přenosu kapaliny [%]	Celkový ukazatel management u vlhkosti textilie
P-BA	průměr	11,68	2,97	15,11	42,26	27,50	27,50	2,46	2,58	617,35	0,72
	směr. odchylka	10,23	0,93	4,63	12,39	2,89	2,89	1,73	0,50	120,32	0,07
P-PE	průměr	28,55	6,04	13,09	51,49	13,75	12,50	0,55	1,96	660,59	0,69
	směr. odchylka	11,37	7,57	6,06	1,83	4,79	5,00	0,34	1,06	261,11	0,09
P-MO	průměr	2,95	3,02	44,63	59,15	26,25	25,00	5,18	5,09	180,35	0,64
	směr. odchylka	0,18	0,18	2,20	3,43	2,50	0,00	0,40	0,40	26,52	0,03
P-TE	průměr	2,32	2,69	41,24	58,45	30,00	28,75	6,19	5,85	189,20	0,65
	směr. odchylka	0,49	0,12	2,29	1,98	0,00	2,50	0,34	0,35	53,61	0,06
P-MMO	průměr	2,53	2,88	43,65	59,35	25,00	26,25	5,15	4,87	153,76	0,61
	směr. odchylka	0,78	0,31	5,04	3,63	0,00	2,50	0,68	0,55	59,68	0,07
P-IME	průměr	7,18	5,22	43,62	12,67	5,00	6,25	0,97	1,42	661,52	0,53
	směr. odchylka	2,95	3,54	1,96	5,45	0,00	2,50	0,73	0,96	269,35	0,11
P-VI	průměr	2,88	2,97	42,66	58,83	22,50	23,75	4,38	4,41	156,70	0,62
	směr. odchylka	0,09	0,14	1,73	1,08	2,89	2,50	0,11	0,12	9,40	0,01
P-COOL	průměr	8,66	8,52	7,96	71,27	18,75	20,00	1,09	1,12	630,02	0,69
	směr. odchylka	3,28	2,29	2,56	13,77	4,79	7,07	0,41	0,48	135,03	0,05
P-PVC	průměr	10,48	4,56	18,32	48,35	23,75	23,75	1,99	2,99	413,25	0,75
	směr. odchylka	1,88	4,69	2,96	7,96	2,50	2,50	0,44	0,61	78,04	0,07

## Příloha 9: Vliv zbývající přidané vlhkosti na termofyziologický komfort

P-BA		Hodnotitel										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
zbývající přidaná vlhkost ve vzorku [g]	zavlhčení vzorku [%]	stupeň suchosti <0,5>									medián stupně suchosti	měrná tepelná jímavost [W·m <sup>-2</sup> ·s <sup>0,5</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
2,80	188	5	5	5	5	5	5	4	4	5	5	859
2,74	184									5		
2,64	177	5					4	4	4			
2,54	170	4	5	5								
2,48	167				5	4						
2,38	160		5	5			4,5	3	3			
2,33	156	4								5		843
2,17	146		4	4			3,5	3	3	5		
2,01	135				4	4						
1,96	132							3	2,5			
1,91	128	4										
1,86	125		3	2,5				3	2	4,5		733
1,75	118						3					
1,65	111		3	3				3	2	4		
1,49	100	4	3	2	5	3	3	3	2	3,5	3	600
1,39	93	3,5						3	2	3,5		
1,33	89						3					
1,23	82	3	3	2				2	2			483
1,13	76				4	3						
1,07	72	3										
1,02	69						2,5			3,5		
0,91	61	3	1	2				1,5	2			
0,86	58				4	3				3		
0,76	51	3	2	2	4	2	2	2	1,5	3	2	469
0,65	44	3	1	2								
0,59	40				4	1,5						
0,55	37	2,5										
0,50	33							1,5	1,5	3		
0,35	24	2,5	2	2	3,5		2	1				
0,26	18	2	1,5	1,5	3	1,5	1,5	1	1	3	1,5	372
0,24	16	1,5			3		1,5	1	1	3	1,5	
0,17	12						1,5	1	1			250
0,13	9	1	1	1	2		1	1	1	2,5	1	
0,07	5	1	1	1	1	1	1	1	1	2,5	1	
0,03	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1,5	1	188
0,00	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	114

P-MO		Hodnotitel										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
zbývající přidaná vlhkost ve vzorku [g]	zavlhčení vzorku [%]	stupeň suchosti <0,5>									medián stupně suchosti	měrná tepelná jímovost [W·m <sup>-2</sup> ·s <sup>0,5</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
1,73	145	5	3	3	5	5	4,5	3	4	5	4,5	947
1,62	136									5		
1,51	127	5			5	5	3	4	4			
1,46	123									5		589
1,35	114	4	3	2,5				3	4			
1,29	109				4	2,5	3	3	3			
1,24	105					3	3					
1,19	100	4	3	3	4	3	3	3	3	4	3	
1,13	95							3	3			
0,97	82		3	3				2	2	4		514
0,86	73		2,5	3	4	3	3	1,5	1,5			
0,70	59	4										
0,60	51	3,5	2	3	4	2	2,5	1,5	1,5	3,5	2,5	419
0,54	45		2	3								
0,49	41	3,5			4	2		1,5	1,5			406
0,45	38						2			3		
0,38	32	3										
0,25	21	2	1,5	2	3	2	1,5	1,5	1	3	2	329
0,21	18				3	2	1,5	1	1			
0,11	9	1,5	1	1,5	3	2	1,5	1	1	2		
0,07	6		1		2,5	1		1	1			
0,05	5	1	1	1,5	2,5	1	1,5	1	1		1	
0,03	2	1	1		2	1		1	1	1	1	134
0,00	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	114

P-TE		Hodnotitel										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
zbývající přidaná vlhkost ve vzorku [g]	zavlhčení vzorku [%]	stupeň suchosti <0,5>									medián stupně suchosti	měrná tepelná jímovost [W·m <sup>-2</sup> ·s <sup>0,5</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
1,89	143	5	5	4	5	4	4,5	3	4	4	4	727
1,72	130						4	3	3	4		
1,55	117	4	4	4	4	3		3	3			
1,43	109		4	3,5			3,5	3,5	2			684
1,32	100	4	4	3,5	4	3	3,5	3	2	4	3,5	
1,26	96	4	4		4	3						
1,21	91		4	3,5				2	2	4		587
1,09	83						3,5					
0,92	70	4	3	3			3			3,5		
0,80	61				4	1,5						
0,75	57	4	2,5	3						3,5		
0,69	52	3,5	3	3	4	2	2,5	2	2	3,5	3	491
0,57	43						2,5	2	2	3		
0,55	41	3	2,5	3								
0,46	35	3	2,5	3	4	2				3		349
0,42	32						2,5	2	2			
0,32	24							2				
0,27	20	2	2	2	4	2	2	2	2	2,5	2	369
0,17	13	2	1	1,5	2,5	1	1,5	1,5	1	2	1,5	354
0,11	9		1		2	1			1	2		
0,06	4	1	1	1			1	1	1	2	1	182
0,00	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	133

P-MMO		Hodnotitel										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
zbývající přidaná vlhkost ve vzorku [g]	zavlhčení vzorku [%]	stupeň suchosti <0,5>									medián stupně suchosti	měrná tepelná jíímavost [W·m <sup>-2</sup> ·s <sup>0,5</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
1,86	148	5	5	3	4	4	4	4	4	5	4	735
1,76	140	4	5	3								
1,66	132							3	2			672
1,61	128				4	4	3	3	2			
1,31	104	4	3	3			3			4		822
1,26	100	4	3	3	4	3	3	3	2	4	3	
1,21	96	4								4		
1,16	92							3	2			493
1,06	84		2,5	2,5				2	2			
1,01	80				4	3						
0,86	68	3,5					2,5					
0,81	64		3	3	4	3	2,5	1,5	1,5	3,5		
0,76	60				4	3						
0,60	48	3,5	2,5	3	4	3	2,5	2	2	3	3	420
0,55	44									3		
0,50	40	3										
0,45	36	2,5						2	2	3		
0,41	33				3	2	2					382
0,35	28	2										
0,30	24				2,5							
0,25	20	1,5	1,5	2,5	2,5	2	2	2	1,5	2,5	2	341
0,19	15				2,5	2						
0,15	12	1,5	1	1			2	1,5	1,5	2		268
0,08	6	1	1	1	2	1	1,5				1	
0,05	4	1	1	1	1	1	1,5	1	1	1	1	175
0,01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	121



P-VI		Hodnotitel										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
zbývající přidaná vlhkost ve vzorku [g]	zavlhčení vzorku [%]	stupeň suchosti <0,5>									medián stupně suchosti	měrná tepelná jímavost [W·m <sup>-2</sup> ·s <sup>0,5</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
1,67	142	4	3	3	5	4	3,5	3	3	5	3,5	877
1,56	133	4			5	4						
1,45	123	4	4	2			3,5	3	3	4,5		
1,40	119	4			5	3						450
1,15	98	3,5	4	2	5	3	2,5	3	2	4	3	
1,02	86	3,5			5	3				4		
0,91	77	3,5			5	3	2,5			3,5		
0,85	72							2	2			421
0,80	67	3	2	2,5						3,5		
0,63	53			2				2	1,5	3,5		
0,57	48	2,5	3	2	4	2	2,5	2	1,5	3,5	2,5	399
0,47	40	2										
0,36	30	2	1,5	2				1,5	1,5			
0,28	24	1,5	2	2	3	2	2	1,5	1,5	3	2	321
0,19	16	1,5						1,5	1,5	2		262
0,14	12	1,5	1	2				1,5	1			
0,11	9		1		3	1,5	1	1	1	2		227
0,07	6		1		2	1	1	1	1		1	
0,03	2	1	1	1		1	1	1	1	2	1	179
0,00	0	1	1	1	2	1	1	1	1	1,5	1	123

P-ME		Hodnotitel										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
zbývající přidaná vlhkost ve vzorku [g]	zavlhčení vzorku [%]	stupeň suchosti <0,5>									medián stupně suchosti	měrná tepelná jímavost [W·m <sup>-2</sup> ·s <sup>0,5</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
2,82	138	4	4	4	5	4	4	4	4	5	4	590
2,60	127				5	4						
2,51	123						3,5	3	3	5		
2,37	116	4	4	4	5	4						
2,28	112							3	3	4,5		
2,10	103				5	3	2,5					
2,06	101	4	4	4	4	4	2,5	2,5	3	4,5	4	525
1,97	96							2,5	3	4,5		
1,83	90	4	4	3,5			2,5	2	3			
1,70	83		3	3	4	4				4		516
1,61	79							2	3			
1,56	77	4								4		
1,52	74	3,5			4	3	2,5	2	3			
1,47	72		2	2						4		420
1,38	68	3,5										
1,30	64				4	3		2	1			
1,20	59	3	2	2						4		
1,11	55		3	2			2	2	1	4		
1,00	49	3	3	2	4	3	2	2	1	3,5	3	328
0,80	39	2,5	2	2				1	1	3		
0,73	36				3	2						
0,66	32	2					2					
0,52	25				3	2						
0,42	21	1,5	1	2	3	2	2	1	1	2	2	272
0,39	19	1,5						1	1	2		
0,35	17	1,5	1,5	1,5				1	1			242
0,30	15	1,5						1	1	2		
0,26	13	1	1	1,5	3	2	1,5	1	1			187
0,12	6	1	1	1,5				1	1	2		
0,08	4	1	1	1	2,5	1,5	1,5	1	1	2	1	170
0,01	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	113

P-PE		Hodnotitel										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
zbývající přidaná vlhkost ve vzorku [g]	zavlhčení vzorku [%]	stupeň suchosti <0,5>									medián stupně suchosti	měrná tepelná jímovost [W·m <sup>-2</sup> ·s <sup>0,5</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
1,97	143	5	3	3	4	3	4	4	4	5	4	788
1,83	133						3,5					
1,70	124	5	2	2	4	2		3	3			491
1,57	114									3,5		
1,51	110						2,5	3	3			
1,44	105	4										
1,38	100	4	2	2	4	2	2,5	3	3	3,5	3	352
1,24	90	4						2	2			
1,18	86	3			4	2						
1,11	81						2,5			3,5		
1,05	76	2	2	1,5				2	2			491
0,98	71									3,5		
0,79	57							2	2			
0,66	48	2	2,5	2	3,5	1	2	2	2	2	2	352
0,46	33	2										
0,39	29	1,5	2	1,5				2	1			334
0,33	24									2		
0,26	19	1,5			3	2		1	1			
0,23	17					1	2	1	1	2		
0,10	7	1	1	1	2	1	2	1	1	2	1	301
0,00	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	110

P-COOL		Hodnotitel										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
zbývající přidaná vlhkost ve vzorku [g]	zavlhčení vzorku [%]	stupeň suchosti <0,5>									medián stupně suchosti	měrná tepelná jímovost [W·m <sup>-2</sup> ·s <sup>0,5</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
0,70	56	4	3	3	3	3	3	3	3	3,5	3	586
0,63	50	3	3	3	3	3	3	3	3	5	3	
0,49	39	3	2	3	2	2	3			3,5		540
0,35	28	2,5					3	2	2			
0,21	17	1,5	1	2								432
0,14	11	1	1		1,5	1	2	2	1	3	1,5	
0,06	4	1	1	1,5	1	1	1,5	2	1	2	1	342
0,00	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	184

P-PVC		Hodnotitel										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
zbývající přidaná vlhkost ve vzorku [g]	zavlhčení vzorku [%]	stupeň suchosti <0,5>									medián stupně suchosti	měrná tepelná jímovost [W·m <sup>-2</sup> ·s <sup>0,5</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
0,86	63	4	3,5	3	3	3	3	3	2	5	3	782
0,66	48	3	2	2,5	2	2	2,5	2	2	4	2	
0,56	41				2	1,5		2	2			
0,46	33	2,5					2			3,5		
0,35	26	2	1	1,5	1	1		2	1			
0,26	19	2	1	1,5				2	1	3		
0,11	8	1,5	1	1	1	1	2	2	1	2,5	1	338
0,07	5	1	1	1	1	1	1,5	2	1	2,5	1	216
0,00	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	211